



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

## TESIS DE MÁSTER

### Máster

Ingeniería Estructural y de la Construcción

### Título

ESTUDIO DE LAS VARIABLES EN EL PROCESO  
DE PRODUCCIÓN DE MORTEROS CON  
ACELERANTE DE FRAGUADO

### Autor

Javier Martos Martínez

### Tutor

Sergio Henrique Píalarissi Cavalaro  
Renan Pícolo Salvador  
Ángel Rueda

### Intensificación

Tecnología

### Fecha

Junio de 2013



## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar quisiera agradecer a Sergio Henrique Pialarissi Cavalaro, tutor de este trabajo final de máster, por su colaboración y por haberme dado la oportunidad de realizar un trabajo bajo su consejo y asesoría.

Agradezco también a Renan Pícolo Salvador, doctorando y compañero de laboratorio, ejerciendo también las labores de tutor y que ha estado siempre a mi disposición para ayudarme y responder siempre a cualquiera de mis dudas.

Mis agradecimientos también para el personal del Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luis Agulló, siempre dispuestos a echar una mano en los trabajos realizados.

Este trabajo no hubiera sido posible sin los materiales suministrados por Industrias Químicas del Ebro, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja y Cementos Molins.

Por último y de forma especial, agradecer a mi familia, por el apoyo constante y el cariño que siempre me han ofrecido.



## RESUMEN

La proyección de un material sobre una superficie a alta velocidad constituye una técnica de construcción interesante desde un punto de vista de productividad, pues combina dos etapas como son la puesta en obra y la compactación en una sola. Además, con el paso de los años, se ha ampliado notablemente el abanico de campos de aplicación de esta técnica.

La proyección de morteros u hormigón también tiene sus inconvenientes. Uno de los principales es el riesgo de desprendimiento de la capa ejecutada sobre una superficie dada, ya que, en muchas ocasiones, el peso propio es mayor que las fuerzas de adherencia entre material y superficie y, en consecuencia, se producen desprendimientos. Este hecho obliga a limitar el peso propio, lo que se traduce en una limitación de espesores de capa a hormigonar. Para espesores superiores a 10 cm, la proyección debe realizarse en varias capas, además, a medida que aumenta el espesor, el rendimiento disminuye, viéndose de esta forma limitados los campos de aplicación de esta técnica constructiva.

Con el fin de compensar estos inconvenientes y aumentar el rendimiento, se plantea reducir el tiempo entre capas empleando aditivos acelerantes de fraguado, para de esta forma alcanzar resistencias tempranas más elevadas. Si bien, el uso de estos aditivos también conlleva en ocasiones y dependiendo del tipo de acelerante empleado, una bajada de las resistencias en edades mayores.

Como se puede ver, la resistencia en edades tempranas es un factor determinante para unos buenos resultados en el uso de esta técnica. En una escala reducida de lo que sería una aplicación real, se busca conocer la influencia de algunas variables en el proceso de producción de morteros sobre el valor de dichas resistencias. El modo de adición del acelerante o los tiempos y velocidades de amasado son variables que influyen en el resultado final y como tales deben ser analizadas.

En el primer capítulo se fijan los objetivos principales de este trabajo y la metodología utilizada para alcanzarlos. En el segundo capítulo se realiza una breve revisión histórica sobre el hormigón proyectado y se describen los aspectos más relevantes que inciden en esta técnica de construcción. Además, se hace una introducción a los distintos tipos de acelerantes y por último se describen distintos ensayos de caracterización usualmente empleados en hormigón proyectado. En el tercer capítulo se hace una revisión de campañas anteriores en esta línea, en concreto se muestra un estudio realizado sobre distintos tipos de acelerantes. En el cuarto capítulo se describe el estudio y los pasos seguidos para obtener el método de producción óptimo. En el quinto capítulo, se describen los diferentes ensayos realizados sobre muestras fabricadas con el método de producción escogido y se exponen los resultados obtenidos de estos ensayos. Por último, en el sexto capítulo se exponen las conclusiones finales y las perspectivas futuras.

## SUMMARY

The projection of a material on a surface at high speed is an interesting construction technique from a viewpoint of productivity, since it combines two steps such as the laying and compaction into one. Furthermore, over the years, has expanded greatly the range of fields of application of this technique.

The projection of mortar or concrete also has its disadvantages. A major amount of material is lost by projecting on inclined surfaces, since, in many cases, the weight is greater than the adhesive forces between material and projected surface, and consequently, detachment occurs. This fact forces to limit the weight, resulting in a limitation of layer thicknesses to be concreted. For thicknesses greater than 10 cm, the projection must be made in several layers, in addition, as the thickness increases, the yield decreases, thus seeing limited fields of application of this construction technique.

In order to compensate for these drawbacks and increase performance, it is proposed to reduce the time between layers using accelerating admixtures, to thereby achieve higher early strength. While the use of this additive also leads sometimes depending on the type of accelerating admixture used, a decrease of resistance in older ages.

The resistance in early age is a determining factor for good results in the use of this technique. On a reduced scale than would a real application, the influence of certain process variables in the production of mortar on the value of this resistance is determinated. The mode of addition of the admixture or times and speeds of mixing are variables that influence the final result and as such must be studied.

In the first chapter, sets out the main objectives of this study and the methodology used to achieve them. In the second chapter, a brief historical review of shotcrete are performed and describes the most important aspects that influence this construction technique. Furthermore, an introduction to the different types of accelerating admixtures is performed and finally various tests usually employed in shotcrete are described. The third chapter is a review of previous campaigns in this subject, in particular shows a study of different types of accelerating admixtures. In the fourth chapter describes the study and the steps taken to obtain the optimal production method. In the six chapter describes the various tests performed on samples made with the production method chosen and the results of these tests. Finally, the sixth chapter discusses the final conclusions and future perspectives.

## ÍNDICE

1. Introducción.....	1
1.1. Prólogo.....	1
1.2. Objetivo general .....	2
1.3. Objetivos específicos .....	3
1.4. Metodología .....	3
1.5. Estructura del documento .....	5
2. Estado del arte.....	7
2.1. Introducción .....	7
2.2. Qué es el hormigón proyectado .....	8
2.2.1. <i>Sistemas de proyección</i> .....	9
2.2.1.1. <i>Vía seca</i> .....	9
2.2.1.2. <i>Vía húmeda</i> .....	9
2.2.2. <i>Campos de aplicación</i> .....	12
2.2.3. <i>Características del hormigón proyectado</i> .....	14
2.2.4. <i>Componentes del hormigón proyectado</i> .....	15
2.3. Los acelerantes en el hormigón proyectado .....	16
2.3.1. La hidratación del cemento y su relación con los aceleantes.....	17
2.3.2. Tipos de acelerante en el hormigón proyectado .....	18
2.3.2.1 <i>Silicatos de metales alcalinos</i> .....	18
2.3.2.2 <i>Aluminatos de metales alcalinos</i> .....	19
2.3.2.3 <i>Alkali-free</i> .....	19
2.4. Ensayos de caracterización y control en hormigón proyectado.....	20
2.4.1. <i>Ensayos indirectos</i> .....	20
2.4.1.1. <i>Ensayo de penetracion (UNE 83 603)</i> .....	21
2.4.1.2. <i>Ensayo de arrancamiento (UNE 83 604)</i> .....	22
2.4.1.3. <i>Ensayo de penetracion-extracción (UNE 83 609)</i> .....	23
2.4.2. <i>Ensayos directos</i> .....	23
2.5. Discusión.....	25
3. Análisis de la metodología previa propuesta por la UPC.....	27
3.1. Introducción .....	27
3.2. Metodología .....	28
3.2.1. <i>Materiales</i> .....	28
3.2.2. <i>Composición de la mezcla</i> .....	29
3.2.3. <i>Procedimiento de producción</i> .....	31

3.2.4.	<i>Ensayos realizados</i> .....	31
3.3.	Resultados y conclusiones .....	31
3.3.1.	<i>Resultados</i> .....	31
3.3.1.1.	<i>Resistencia a flexión</i> .....	32
3.3.1.2.	<i>Resistencia a compresión</i> .....	33
3.3.2.	<i>Conclusiones</i> .....	35
4.	Estudio previo de variables .....	37
4.1.	Introducción .....	37
4.2.	Metodología .....	38
4.2.1.	<i>Materiales</i> .....	38
4.2.2.	<i>Composición de la mezcla</i> .....	39
4.2.3.	<i>Procedimiento de producción</i> .....	40
4.2.4.	<i>Ensayos realizados</i> .....	41
4.3.	Resultados y conclusiones .....	42
4.3.1.	<i>Resultados</i> .....	42
4.3.2.	<i>Conclusiones</i> .....	56
5.	Estudio con el método de producción escogido.....	59
5.1.	Introducción .....	59
5.2.	Metodología .....	60
5.2.1.	<i>Ensayos realizados</i> .....	61
5.3.	Resultados y conclusiones .....	64
5.3.1.	<i>Resultados</i> .....	64
5.3.1.1.	<i>Evolución de temperaturas</i> .....	64
5.3.1.2.	<i>Resistencia a la penetración</i> .....	66
5.3.1.3.	<i>Densidad y porosidad</i> .....	68
5.3.1.4.	<i>Resistencia a flexión</i> .....	70
5.3.1.5.	<i>Resistencia a compresión</i> .....	73
5.3.2.	<i>Conclusiones</i> .....	76
5.3.2.1.	<i>Conclusiones de la ejecución de ensayos</i> .....	76
5.3.1.2.	<i>Conclusiones de los resultados</i> .....	76
5.4.	Propuesta formal del método de producción.....	77
6.	Conclusiones finales y perspectivas futuras.....	79
6.1.	Conclusiones generales.....	79
6.2.	Conclusiones específicas .....	80
6.3.	Perspectivas futuras .....	81
	Bibliografía .....	83



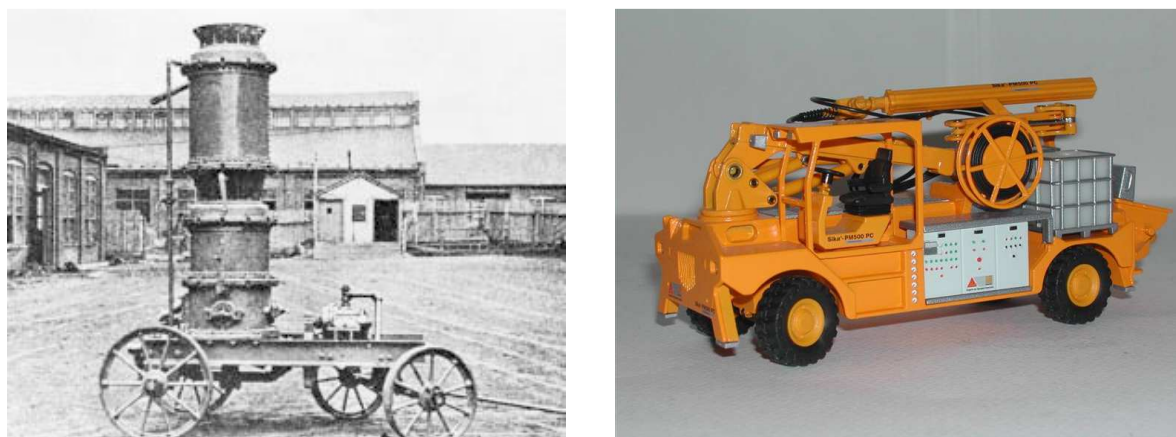
# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Prólogo

Desde que el hormigón proyectado empezó a utilizarse como técnica constructiva, se ha producido un continuo desarrollo tecnológico, tanto en materiales y maquinaria como en su aplicación y control de calidad. A modo de ejemplo de esta evolución, en la figura 1.1 se observa la diferencia de tecnología entre dos máquinas de hormigón proyectado, la primera de inicios del siglo XX y la segunda de la última década.

Las múltiples ventajas que ofrece el hormigón proyectado como la posibilidad de realizar proyectos que no serían posibles con métodos convencionales de hormigonado o sus elevados rendimientos, contribuyen a la evolución constante de la técnica. Además, con el paso de los años, el abanico de campos de aplicación en los que es posible utilizar hormigón proyectado se amplía, yendo éste desde el sostenimiento de túneles hasta la protección contra incendios en estructuras metálicas <sup>(1)</sup>.

La proyección de un material sobre una superficie a alta velocidad constituye una técnica de construcción interesante desde un punto de vista de productividad, pues combina dos etapas como son la puesta en obra y la compactación en una sola.



*Figura 1.1 - a) Máquina de proyección de principios de siglo XX b) Máquina para proyección de finales de siglo XX*

No obstante, la proyección de morteros u hormigón también tiene sus inconvenientes. Uno de los principales es el riesgo de desprendimiento de la capa ejecutada sobre una superficie dada, ya que, en muchas ocasiones, el peso propio es mayor que las fuerzas de adherencia entre material y superficie y, en consecuencia, se producen desprendimientos. Este hecho obliga a limitar el peso propio, lo que se traduce en una limitación de espesores de capa a hormigonar. Para espesores superiores a 10 cm, la proyección debe realizarse en varias capas, además, a medida que aumenta el espesor, el rendimiento disminuye, viéndose de esta forma limitados los campos de aplicación de esta técnica constructiva.

Con el fin de compensar estos inconvenientes y aumentar el rendimiento, se plantea reducir el tiempo entre capas empleando aditivos acelerantes de fraguado, para de esta forma alcanzar resistencias tempranas más elevadas. Si bien, el uso de estos aditivos también conlleva en ocasiones y dependiendo del tipo de acelerante empleado, una bajada de las resistencias en edades mayores.

Como se puede ver, la resistencia en edades tempranas es un factor determinante para unos buenos resultados en el uso de esta técnica. En una escala reducida de lo que sería una aplicación real, se busca conocer la influencia de algunas variables en el proceso de producción de morteros sobre el valor de dichas resistencias. El modo de adición del acelerante o los tiempos y velocidades de amasado son variables que influyen en el resultado final y como tales deben ser analizadas.

## **1.2. Objetivo general**

Con el fin de responder a las necesidades planteadas en este ámbito, se propone como objetivo general de este trabajo la propuesta de una metodología para la caracterización de acelerantes de fraguado en laboratorio empleando mezclas con mortero.

De esta forma, se busca tener una forma de caracterizar estos aditivos acelerantes en laboratorio, sin la necesidad de realizar estudios a una escala mayor como bien podría ser la proyección de hormigón o de mortero mismamente. Este tipo de actividades, requerirían de medios mucho más potentes, así como de espacios mayores, lo cual no se encuentra en muchos de los laboratorios, sin embargo, los medios requeridos para la metodología propuesta se encuentran en la mayoría de los laboratorios dedicados a este fin.

### 1.3. Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general del punto anterior, se plantean una serie de objetivos específicos, los cuales se presentan al principio de los capítulos que conforman el trabajo y que se exponen a continuación.

- Estudio de la literatura referente a hormigón proyectado, los acelerantes y su influencia, y los distintos ensayos de caracterización empleados de forma usual.
- Análisis de los métodos convencionales tradicionalmente empleados para la caracterización de los acelerantes en mezclas de mortero mediante el estudio de campañas previas.
- Determinación de las variables que inciden sobre el método de producción de mezclas de mortero y evaluación de la influencia de cada una de ellas.
- Elección del método de producción óptimo a partir de la combinación de las distintas variables estudiadas.
- Validación del método de producción escogido mediante la ejecución de distintos ensayos realizados sobre varias muestras, centrándose principalmente en el análisis de los resultados de los valores promedio y las dispersiones internas.

### 1.4. Metodología

Para alcanzar los objetivos descritos anteriormente se han realizado diversos trabajos, los cuales corresponden en gran medida a los capítulos que forman este documento. A continuación, se describe la metodología empleada para llevar a cabo el estudio.

El estudio se inicia con un repaso a los métodos convencionales tradicionalmente empleados para la caracterización de los acelerantes en mezclas de mortero. Para ello, se realiza un análisis sobre campañas previas, en concreto se revisa un estudio realizado en la UPC sobre 6 tipo de acelerantes (AKF-125, AKF-80 AF, AKF-70 AF, L53 AF, M2 y M4) con los que se han elaborado un total de 32 muestras modificando la dosis de acelerante (5, 7 y 9% sobre el peso de cemento para los 4 primeros; 9 y 11% spc para los dos últimos). Los resultados de éste, se utilizan para comparar con los resultados obtenidos del nuevo estudio.

No obstante, en la campaña anterior, no se ha realizado análisis alguno sobre las variables en el proceso de producción de las mezclas. Se considera que variables como el modo de adición del acelerante, o los tiempos y velocidades de amasado, influyen sobre el resultado final de la mezcla y por tanto, deben ser estudiadas. Para llevar a cabo esta tarea, se realiza un estudio sobre estas variables utilizando AKF-125, un acelerante libre de álcalis en dosis de 5 y 7% spc. Mediante el ensayo de penetración, se escoge la combinación de éstas que ofrece unos mejores resultados en relación a resistencias, tanto en valores promedio como en dispersión de los datos. Una vez elegida la combinación de variables que aporta mejores resultados, se realizan toda una serie de ensayos (evolución de temperaturas, ensayo de penetración, ensayo de densidad y porosidad y resistencias a flexión y compresión) sobre nuevas muestras con el fin de validar la combinación de variables escogida como método de producción óptimo. Por último, se realiza una descripción formal del nuevo método propuesto para la caracterización de acelerantes a nivel mortero, con el cual se espera reducir la variabilidad entre datos, especialmente en las resistencias obtenidas en estudios anteriores. En la figura 1.2 pueden verse las distintas etapas de estudio.

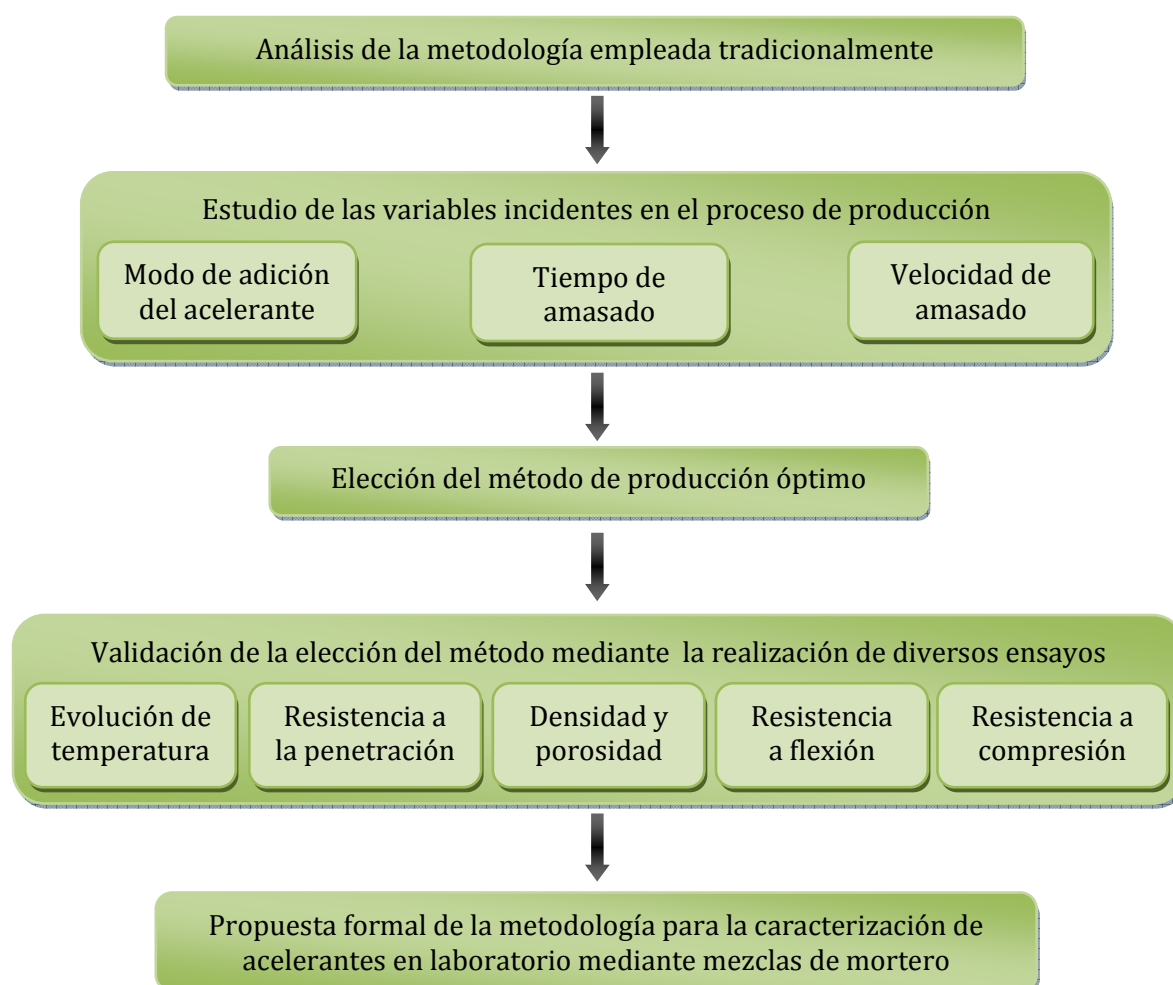


Figura 1.2 - Etapas del estudio

## **1.5. Estructura del documento**

El presente trabajo de máster se estructura en seis capítulos, cada uno de los cuales hace referencia a una parte de los trabajos realizados. A continuación, se describe la estructura de cada uno de ellos.

En el primer capítulo, se realiza una breve introducción al tema tratado, se fijan los objetivos del trabajo, tanto el general como los específicos y finalmente se describe la metodología utilizada para alcanzarlos. En el segundo capítulo se realiza una breve revisión histórica sobre el hormigón proyectado y se describen los aspectos más relevantes que inciden en esta técnica de construcción. Además, se hace una introducción a los distintos tipos de acelerantes y por último se describen distintos ensayos de caracterización usualmente empleados en hormigón proyectado. En el tercer capítulo se hace una revisión de las campañas anteriores realizadas en esta línea, en concreto se muestra un estudio realizado sobre distintos tipos de acelerantes. En el cuarto capítulo se describe la campaña preliminar realizada para obtener el método producción óptimo y en la cual se estudia cada una de estas variables por separado con el fin de obtener la mejor combinación de las mismas. En el quinto capítulo, se describen los diferentes ensayos realizados sobre muestras fabricadas con el método de producción escogido y se exponen los resultados obtenidos de estos ensayos. Además, se propone formalmente el método de producción escogido. Por último, en el sexto capítulo, se exponen las conclusiones globales del trabajo y las perspectivas futuras.



## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Introducción

Este capítulo tiene como objetivo el estudio de la literatura referente a hormigón proyectado, los acelerantes y su influencia, y los distintos ensayos de caracterización empleados tradicionalmente. En primer lugar, se da una visión global del hormigón proyectado como técnica de puesta en obra, mostrando así los aspectos más relevantes en relación al material, campos de aplicación y sistemas de proyección. A continuación, se exponen los distintos tipos de aditivos acelerantes que se han venido empleando hasta la actualidad y sus principales características y por último se describen los ensayos de caracterización más comúnmente usados en hormigón proyectado, diferenciándolos en indirectos y directos

El uso generalizado del hormigón proyectado, como elemento fundamental en el sostenimiento y revestimiento de obras subterráneas, ha motivado un continuo desarrollo tecnológico, tanto en materiales y maquinaria como en su aplicación y control de calidad.

La primera patente sobre un sistema de proyección de hormigón (vía seca) data del año 1911, y pertenecía a Carl Ethan Akeley, fundador de la empresa Allentown Pneumatic

Gun. En 1930 se patentó en Alemania y en 1945, el uso de estos sistemas ya se había extendido a más de 120 países. En 1957, Mayco Equipment introduce en el mercado la primera máquina de rotor, que supuso una revolución a la proyección del hormigón, pues permitía la aplicación continua de hormigón proyectado.

No fue hasta los años sesenta cuando se empezó a desarrollar el método de proyección por vía húmeda y en los setenta, su uso se colocó por delante del de la vía seca en los países escandinavos.

Durante los años ochenta, se comenzó a sustituir el refuerzo convencional por el uso de fibra metálica, sobre todo en los países que ya habían adoptado la vía húmeda como el método de proyección más usual. En los noventa se globalizó su empleo, el cual permitía una clara reducción de costes, además de unos menores plazos de ejecución.

A partir del año 2000, con los avances tecnológicos y químicos, se ha favorecido la aparición de aditivos que aportan grandes ventajas al hormigón, haciéndolo incluso mejor que el convencional en algunas ocasiones.

A pesar de que el uso del hormigón proyectado se ha generalizado en la construcción subterránea, este material ofrece la posibilidad de una gran variedad de aplicaciones, entre las que destacan el recubrimiento de canales, reconstrucción y reparación, protección contra incendios o ejecución de depósitos. Aunque estas aplicaciones aporten unos condicionantes algo diferentes, es cierto que abren un amplio abanico de campos de aplicación, así como nuevos retos tecnológicos.

## 2.2. Qué es el hormigón proyectado

Tal y como se establece en la Norma UNE 83-600-94 o UNE 83-607-94, el Hormigón Proyectado se define como un hormigón cuyo tamaño máximo de árido es superior a 8 mm y que aplicado a una máquina se proyecta a gran velocidad sobre una superficie a través de una manguera y boquilla. Define asimismo Mortero Proyectado como la mezcla cuyo tamaño máximo de árido está por debajo de 8 mm. (2)

Si bien se podría entender que el hormigón proyectado es un hormigón especial, lo cierto es que no es sino una manera más de colocar el hormigón. De la misma forma que ocurre con el hormigón convencional, el proyectado requiere ciertas características particulares durante su puesta en obra, y al mismo tiempo requiere satisfacer todas las demandas tecnológicas normales del hormigón (relación agua/cemento, cantidad de cemento, consistencia, etc.)

La proyección del hormigón se realiza, básicamente, mediante dos técnicas denominadas *vía seca* y *vía húmeda*, las cuales dan lugar a hormigones proyectados de características distintas.



### 2.2.1. Sistemas de proyección

#### 2.2.1.1. Vía seca

Como ya se ha comentado anteriormente, el sistema de mezcla seca fue el más empleado hasta la década de los setenta. En la figura 2.1 se puede ver las diferentes partes de este sistema de mezcla. En la vía seca, los componentes del hormigón (cimento y áridos) se mezclan previamente, excepto el agua, que se añade en la boquilla antes de la proyección de la mezcla, transportándose la mezcla en seco a través de la manguera gracias a la acción del aire comprimido.

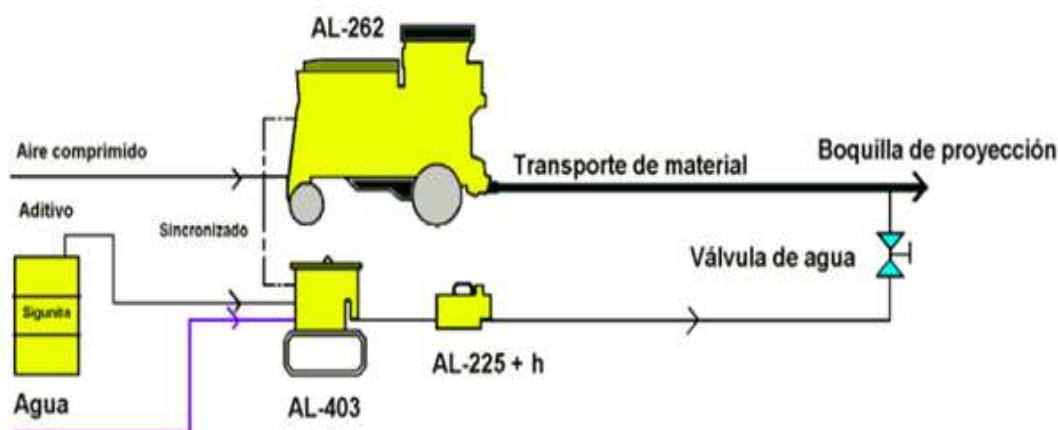


Figura 2.1 - Esquema del sistema de vía seca

Si bien, la relación agua/cemento tiene una influencia fundamental en la calidad del hormigón proyectado, no existe un valor definido debido a que es el operario de la boquilla quien controla y regula la cantidad de agua que se incluye en la mezcla. No obstante, en la práctica, el factor agua/cemento es bastante constante debido a que el alcance de la variación es limitado: si se agrega agua insuficiente, se crea un exceso de polvo; si se agrega demasiada cantidad, el hormigón no se adherirá a la superficie proyectada.

En este sistema, también es importante controlar la humedad de los áridos. Si la mezcla está demasiado seca producirá gran cantidad de polvo; si la humedad es elevada, el rendimiento disminuye, pueden producirse atranques en máquinas o mangueras y existe el riesgo de fraguado del hormigón en el interior del silo o cuba.

La elevada generación de polvo, el alto porcentaje de rechazo y los bajos rendimientos de proyección hacen de la vía seca un método con demasiadas desventajas frente a la vía húmeda.

#### 2.2.1.2. Vía húmeda

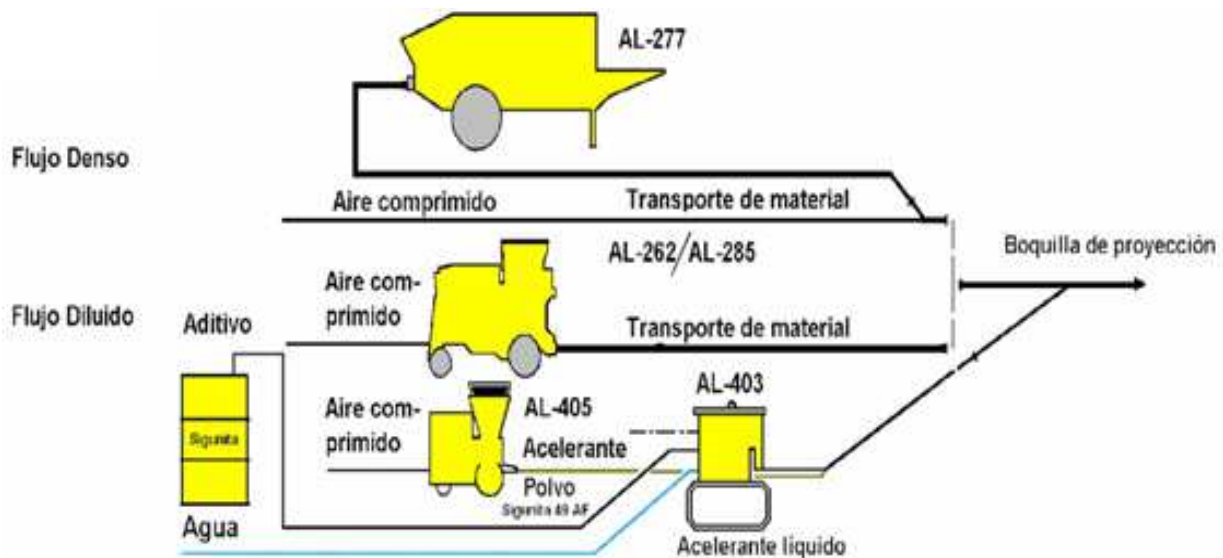
La proyección por vía húmeda es el método más empleado actualmente y el que mayores rendimientos ofrece. En la figura 2.2 se observan las diferentes partes del sistema

de mezcla húmeda, la cual se realiza con equipos especiales (robots de proyección) que transportan el hormigón preparado con el agua y aditivos necesarios en el interior de las mangueras y que posteriormente será proyectado a través de la boquilla.

La impulsión del hormigón a través de la manguera puede realizarse por dos métodos, según si la máquina de proyección es de flujo diluido (transporte por aire comprimido), o bien de flujo denso (transporte por bombeo).

Los recientes progresos, tanto de nuevas máquinas como de aditivos estabilizadores, han conducido a un sistema perfectamente compatible con el fin deseado y con ventajas importantes como la no-formación de polvo y el mantenimiento de la relación a/c.

Las diferencias entre un hormigón proyectado aplicado por vía seca y por vía húmeda no son sólo las relativas al sistema de proyección elegido, sino que los hormigones resultantes son dos materiales totalmente diferenciados.



*Figura 2.2 - Esquema del sistema de vía húmeda*

La elección de uno u otro tipo de hormigón asociado a una técnica de proyección, va en función de diversos factores, algunos de los cuales se señalan a continuación:

- Características del hormigón requerido: En las mismas condiciones, se obtienen mejores resultados con la vía húmeda, ya que introduce menos aire en la mezcla por diferencia del sistema de transporte.
- Características de producción: La vía seca es más versátil mientras que la vía húmeda requiere grandes áreas de trabajo para conseguir grandes rendimientos. Si bien es cierto, la aparición de inhibidores de fraguado han contribuido a flexibilizar la vía húmeda.

- Características de la obra: Por ejemplo si es obra lineal o no, la superficie a proyectar o su geometría. En concreto en túneles, para obtener altos rendimientos es necesario el uso de robots, lo que facilita el acceso a la vía húmeda.
- Características de la empresa: En general las empresas pequeñas tienden al uso de la vía seca, puesto que la maquinaria para el empleo de vía húmeda suelen tener precios elevados. No obstante, a veces el hecho de estar acostumbrado a trabajar de una forma u otra es lo que hace declinarse por un método.
- Características medioambientales: La formación de polvo es un factor muy tenido en cuenta en los últimos tiempos, lo cual hace a muchas empresas declinarse por la vía húmeda.

Por lo general, en España, las aplicaciones de hormigón proyectado han tenido bajos niveles de exigencia desde el punto de vista estructural (piscinas, protecciones de terrenos, etc.) lo que ha influido en la potenciación de la vía seca. No obstante, las prestaciones requeridas cada vez son mayores, lo cual hace que las tendencias actuales apunten hacia el empleo de hormigón proyectado por vía húmeda (3).

En la tabla 2.1 se presenta una comparativa esquemática entre los dos sistemas de proyección. Como conclusión, se puede afirmar que la vía seca es una buena elección en áreas pequeñas, en obras donde la proyección deba ser interrumpida por diversos factores o bien, en espacios abiertos donde la generación de polvo no sea una condición ambiental tan decisiva como lo es por ejemplo en el interior de un túnel. Mientras, la vía húmeda será rentable en obras lineales donde sean necesarios grandes rendimientos y en zonas continuas donde no sea necesaria la interrupción del proceso.

*Tabla 2.1 - Comparativa entre vía seca y vía húmeda (4)*

Vía seca	Vía húmeda
Menor coste de equipo	Mayor coste de equipo
Relación a/c variable (control en boquilla)	Relación a/c regular (Dosificación de agua controlada)
Menor rendimiento de equipo	Mayor rendimiento de equipo
Mayor rebote	Menor rebote
Permite mayores distancias del equipo al punto de aplicación	Permite menores distancias del equipo al punto de aplicación
Las interrupciones no retardan el proceso en exceso	Las interrupciones son problemáticas
Más generación de polvo	Menor generación de polvo
Espesores elevados mediante varias aplicaciones	Permite espesores mayores en una sola aplicación

### 2.2.2. Campos de aplicación

El hormigón proyectado ofrece un amplio abanico de aplicaciones, cada una de las cuales requiere unas ciertas características en cuanto a resistencia, durabilidad, estética, etc. A continuación se presenta una breve descripción de los principales campos de aplicación del material.

- **Túneles:** Es el campo donde más se ha desarrollado la técnica del hormigón proyectado. La necesidad de cubrir grandes superficies con espesores no demasiado grandes convierten al hormigón proyectado en una gran herramienta para llevar a cabo dicha acción. Aunque tradicionalmente, se venía empleando como un sostenimiento provisional, el avance en las técnicas y la mejora de prestaciones han hecho que finalmente se emplee como revestimiento definitivo en túneles. En los últimos años, se está incorporando el uso de fibras metálicas en el hormigón proyectado, siendo éstas su único refuerzo, en sustitución del armado convencional que se venía utilizando hasta el momento. En la figura 2.3 se observa a un operario junto al robot que realiza las tareas de proyección en el interior de un túnel.



*Figura 2.3 - Robot proyectando en el interior de un túnel*

- **Canalizaciones:** El hecho de ser una obra lineal hace que el hormigón proyectado sea una herramienta muy aconsejable en su construcción. Las canalizaciones son al igual que los túneles obras donde es necesario proyectar grandes superficies con espesores relativamente reducidos. Otra ventaja clave es que el hormigón proyectado ofrece una gran afinidad con todo tipo de geotextiles o membranas que proporcionan la estanqueidad suficiente.
- **Estabilización de taludes:** El hormigón proyectado se emplea usualmente tanto en estabilización de taludes de tierras como de macizos rocosos o bloques sueltos, evitando así desprendimientos. A veces, se acompaña de la acción de bulones y es frecuente el uso de fibras con la finalidad de resistir impactos que puedan dañar el

revestimiento. En la figura 2.4 se muestra el proceso de estabilización de un talud mediante hormigón proyectado.



*Figura 2.4 - Operario realizando la estabilización de un talud*

- Reparación de estructuras: La utilización del hormigón proyectado en este campo ha llevado a una evolución y desarrollo del mismo, debido a la necesidad de comportarse como un material estructural. Tiene como ventajas un rápido acceso a cualquier paramento o esquina y no necesita ningún encofrado más que el propio elemento a reforzar. Es obvio que los requisitos exigidos al material en esta función, son superiores que en el resto de aplicaciones.
- Depósitos: El principal motivo del uso de hormigón proyectado en este tipo de construcciones es la estanqueidad que aporta este material.
- Piscinas: En los últimos años se ha incrementado su uso notablemente en este tipo de construcciones. La principal ventaja es que el hormigón proyectado se adapta a cualquier superficie y ofrece un acabado de calidad. En la figura 2.5 se puede observar un operario realizando la tarea de proyección para una piscina.



*Figura 2.5 - Proyección de hormigón en una piscina*

- Protección de estructuras metálicas: Fue uno de los principales campos de aplicación de este material en el mundo de la construcción. El hormigón proyectado puede llegar a resistir 1200°C de temperatura en incendios. Actualmente, ha sido parcialmente sustituido por el uso de materiales sintéticos como la espuma, los cuales aportan ventajas tanto en la aplicación, como en el tema económico.
- Otros campos: El hormigón también ha sido y es empleado en la construcción de esculturas, en pantalla marinas o en la protección y estabilización de muros de mampostería de piedra o ladrillo.

### 2.2.3. Características del hormigón proyectado

A continuación, en los siguientes puntos, se exponen las principales características del hormigón proyectado como material de construcción.

- Resistencia a compresión: Actualmente es el parámetro de control y diseño del hormigón proyectado. Según investigaciones recientes, es posible obtener hormigones proyectados con resistencias de hasta 70 MPa a 28 días. No obstante, las demandas actuales en la construcción de túneles se encuentran alrededor de 25 MPa. En la tabla 2.2 se muestran los valores de resistencia a compresión requeridos actualmente en la elaboración de proyectos.

*Tabla 2.2 - Valores de resistencia a compresión requeridos según edad <sup>(4)</sup>*

Resistencia a compresión		
Edad (días)	Valor medio (MPa)	Valor mínimo (MPa)
1	10	9
3	14	12
7	20	18
28	28	25

- Porosidad: El valor de porosidad en un hormigón convencional se encuentra en 5-6%. En hormigón proyectado, este valor es algo superior, pues el transporte del material a través de las mangueras se realiza mediante aire comprimido, parte del cual queda atrapado en el interior de la mezcla. Así pues, para hormigón proyectado (vía húmeda), se alcanzan valores de 10-12% incluso algo superiores.
- Homogeneidad: Este es un aspecto a tener en cuenta, ya que aporta un dato muy importante sobre la calidad de la obra ejecutada. Un coeficiente de variación por debajo del 10% es un valor aceptable.
- Rebote: Este factor es uno de los más importantes en hormigón proyectado. El rebote está formado por los componentes que no se adhieren a la superficie de soporte y su

principal efecto se da sobre el aspecto económico. Este factor depende a su vez de diversos factores como son la relación agua/cemento, tipo de proyección, proporción de la mezcla, maquinaria empleada, tipo de árido, velocidad de proyección, o el operario, el cual debe contar con una cierta experiencia, pues es el factor más influyente en la cantidad de rebote.

- **Formación de polvo:** Cada vez más los requisitos en temas de seguridad y salud son más estrictos, especialmente en zonas de trabajo con condiciones ambientales menos óptimas, como construcción en túneles (campo de aplicación más importante del hormigón proyectado). Con la vía húmeda, la formación de polvo disminuye notablemente, no obstante el uso de aire comprimido en el transporte de la mezcla hace que esta formación no pueda eliminarse en su totalidad.
- **Capacidad de producción:** Cuando se trata de obras lineales o grandes superficies, la capacidad de producción juega un papel importante. En la tabla 2.3, se muestran los valores de producción ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) en función del sistema de proyección, donde puede verse claramente que la vía húmeda es superior a la vía seca en dicho aspecto.

*Tabla 2.3 - Capacidad de producción en función del sistema de proyección empleado*

(<sup>4</sup>)

Sistema de proyección	Capacidad de producción ( $\text{m}^3/\text{h}$ )
Vía seca	3-9
Vía húmeda	8-25

#### **2.2.4. Componentes del hormigón proyectado**

La fabricación del hormigón proyectado debe realizarse en plantas que dispongan de todos los elementos necesarios para conseguir una mezcla homogénea y que disponga también de un sistema de dosificación de áridos y aditivos suficientemente preciso. La falta de esta homogeneidad, suele ser uno de los factores que producen más averías en los sistemas de proyección.

De la misma forma que es importante la homogeneidad en la mezcla, también lo es la calidad de los materiales a emplear, los cuales son muy similares a los empleados en el hormigón convencional.

Los cementos empleados en la formación de hormigón proyectado suelen ser del tipo CEM I con clase resistente 42,5R y 52,5R, es decir, cementos con un rápido endurecimiento, los cuales aseguran elevadas resistencias iniciales.

La dosificaciones de cemento acostumbran a estar entre 450-500  $\text{kg}/\text{m}^3$ , valores bastante superiores a los empleados en hormigón convencional (250-300  $\text{kg}/\text{m}^3$ ). La razón principal de este incremento de contenido de cemento es la pérdida de material producida

por el rebote y que hace que en la dosificación inicial sea necesario añadir una mayor cantidad, previendo la pérdida que se dará durante la proyección.

Por lo que respecta al agua, en la vía húmeda se añade en la mezcla y la relación agua/cemento oscila entre 0,35 y 0,55. Además también debe ser tenida en cuenta el agua procedente de la humedad de los propios áridos.

En cuanto a áridos se refiere, no existen demasiadas restricciones, ya que pueden variar en procedencia (naturales o de machaqueo) y forma (angulados o rodados). No obstante, el tamaño si es importante, pues éste se encuentra limitado a 15 mm, excepto para rellenar grandes cavidades, donde es posible empleo de áridos de hasta 25 mm.

También es usual el empleo de adiciones como cenizas volantes, las cuales actúan como paliantes de efectos negativos de ciertos aditivos necesarios como los acelerantes, aumentando su resistencia final. Además, mejoran otras características como el rebote, aumenta la densidad y reduce el polvo en la zona de trabajo.

Cada vez más se viene empleando el uso de fibras en hormigón proyectado, las cuales mejoran su comportamiento a tracción y suelen ser empleadas en sostenimiento de túneles y revestimiento de taludes.

Como aditivos, cabe destacar entre otros muchos los superplastificantes y los acelerantes de fraguado. Los primeros son aditivos reductores de agua que tienen la función de mejorar la trabajabilidad de la mezcla. Estos aditivos son capaces de reducir la demanda de agua en un 40%. Los segundos, reducen el asentamiento en el momento de la proyección, es decir, proporcionan resistencias iniciales mayores, sin las cuales no sería posible aplicar el hormigón proyectado en el área de trabajo. En contrapartida, cabe añadir que los acelerantes reducen en parte la resistencia final del hormigón.

### **2.3. Los acelerantes en el hormigón proyectado**

La diferencia del hormigón proyectado con el convencional es la ausencia de encofrados en su puesta en obra, sustituida por un fraguado casi instantáneo del material. Este rápido fraguado se debe a la acción química de distintos productos específicos llamados acelerantes. El efecto de estos aditivos sobre la resistencia inicial depende básicamente de su base química, de la dosis, de la composición química del cemento, la presencia de adiciones minerales y de la temperatura <sup>(5)</sup>.

Estos aditivos permiten conseguir una reducción del asentamiento, dando una mayor consistencia a la mezcla y por lo tanto, se consigue una adherencia mayor a la superficie proyectada. Gracias a esto, los aditivos acelerantes permiten poder proyectar sobre superficies verticales o sobre la clave de un túnel sin que haya un rebote importante.

Los acelerantes aumentan la resistencia inicial de la mezcla, pero, en contrapartida, reducen la resistencia final, en comparación con una mezcla sin aditivo. Es por esto que es



importante dosificar el aditivo en su justa medida y no abusar del mismo (por ejemplo, menor empleo de aditivo en las paredes que en la clave de un túnel).

Tradicionalmente, los acelerantes que se han venido empleando estaban basados en silicatos o aluminatos. Si bien, las directrices de seguridad y salud cada vez son más estrictas, lo que ha llevado al desuso de este tipo de aditivos, sustituyéndolos por nuevos aditivos libres de álcalis.

### 2.3.1. Hidratación del cemento y la relación con los acelerantes

El cemento Portland se encuentra compuesto, básicamente, por clínker y sulfato de calcio. La composición del clínker se basa en silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico. La proporción relativa entre cada uno de estos compuestos depende de la fuente de materias primas y del proceso de formulación empleado por las industrias cementicias. En la tabla 2.4 se muestran estos componentes junto a su formulación, su nomenclatura y el porcentaje aproximado en el cemento.

Tabla 2.4 - Componentes principales del clínker <sup>(6)</sup>

Compuestos anhidros	Formulación	Nomenclatura	Proporción en el cemento (% en masa)
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	50 – 70
Silicato bicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	15 – 30
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	5 – 10
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	5 – 15

Los cementos son conocidos como ligantes hidráulicos, pues, por medio de las reacciones de hidratación que ocurren cuando son mezclados con agua, se forman compuestos hidratados capaces de ligar partículas como los áridos. Esta hidratación del cemento implica una serie de reacciones y procesos químicos que se producen a escala diferente en el tiempo. Así pues, se tienen desde procesos hidráulicos prácticamente instantáneos hasta procesos que se manifiestan a lo largo de horas e incluso años. El proceso de hidratación del cemento puede ser dividido en 4 fases. En la figura 2.6. se muestran estas etapas en un grafico de Flujo de calor-Tiempo.

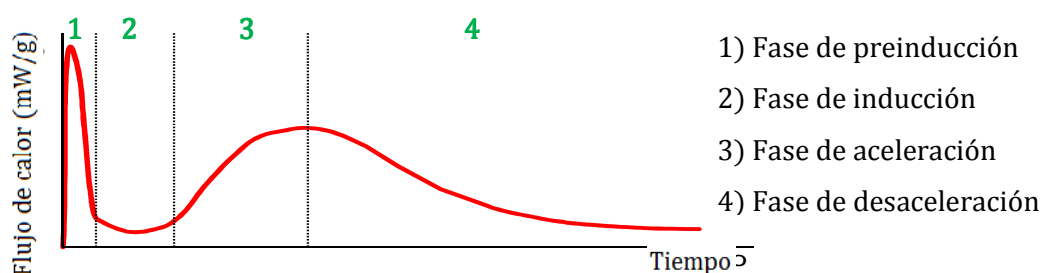


Figura 2.6 - Fases de la hidratación del cemento

- Fase de preinducción: El cemento entra en contacto con el agua y se genera un pico de calor, producido por la disolución de  $C_3A$  y  $C_3S$ , así como de los sulfatos presentes en el cemento (<sup>7</sup>). Se produce la formación de etringita sobre la superficie del  $C_3A$  por la reacción de éste con el sulfato de calcio y el agua.
- Fase de inducción: Baja actividad de hidratación y la liberación de calor cae. Durante este período la pasta continua manteniendo la trabajabilidad. La concentración de iones  $Ca^{2+}$  y  $OH^-$  incrementa hasta la saturación.
- Fase de aceleración: Durante esta fase aumenta de nuevo el calor desprendido por las reacciones y corresponde al inicio de la fase de endurecimiento. La portlandita  $Ca(OH)_2$  empieza a cristalizar y el  $C_3S$  empieza a hidratarse. Durante esta fase se produce la mayor cantidad de C-S-H y también de etringita por la hidratación del  $C_3A$ .
- Fase desaceleración: Durante este período la velocidad de reacción comienza a disminuir y la etringita puede pasar a monosulfoaluminato como consecuencia de la disminución de iones  $SO_4^{2-}$ .

Tras la finalización de esta última etapa, las reacciones transcurren a muy baja velocidad controladas por difusión. La hidratación total nunca es alcanzada bajo condiciones ambientales.

La acción de los acelerantes de fraguado recae básicamente sobre los aluminatos del cemento, es por esto que la hidratación de los silicatos se considera una fase no tan primordial en el estudio de estos aditivos. Por otro lado, cabe destacar que la inclusión de un acelerante en el cemento reducirá notablemente el periodo de inducción (fase 2), consecuentemente, la aceleración (fase 3, proceso de fraguado) se producirán antes y más rápido.

### ***2.3.2. Tipos de acelerante en el hormigón proyectado***

Existen una gran variedad de compuestos químicos que permiten acelerar el proceso de fraguado, sin embargo, si consideramos los posibles efectos secundarios sobre el hormigón, costes y otras posibles desventajas, éstos se ven reducidos a tres especies principales: Silicatos de metales alcalinos, Aluminatos de metales alcalinos y Alkali-free.

#### ***2.3.2.1. Silicatos de metales alcalinos***

Este tipo de aditivos se utilizan principalmente en hormigón proyectado por vía húmeda y se caracterizan por un efecto momentáneo (inferior a los 10 segundos) de pérdida de asentamiento de la mezcla. A diferencia de los aditivos basados en aluminatos y los libres de álcalis, no participan en el proceso de hidratación (siempre que las dosificaciones no excedan el 20% en peso del cemento).

Como ventajas de este tipo de aditivos, podemos destacar que funcionan en toda clase de cementos, que ofrecen disminuciones de resistencias finales relativamente pequeñas, que no son tan dañinos para la piel como los aluminatos ( $\text{pH} < 12$ ) y que cuentan con un menor contenido de álcalis que estos últimos.

Sin embargo, no pueden ser empleados en ambientes con temperaturas inferiores a  $5^{\circ}\text{C}$  y además, no aportan una gran resistencia inicial, lo cual limita su uso a soportes permanentes, o soportes temporales donde no se requieran resistencias iniciales como por ejemplo en roca dura.

#### *2.3.2.2. Aluminatos de metales alcalinos*

Estos acelerantes son los más empleados tanto en vía seca como en vía húmeda y las dosificaciones más comunes están entre 2,5 y 5,5%.

Debido a su alto rendimiento, estos acelerantes permiten aplicar capas de gran espesor. La adquisición de resistencia comienza 5-10 minutos tras su puesta en obra y en 20-30 minutos puede considerarse autoportante. Es por esto que los aluminatos, a diferencia de los silicatos, permiten la aplicación sobre terrenos más inestables o recién excavados.

En contrapartida, estos acelerantes conllevan una disminución de la resistencia última de un 20-25% y tienen un gran contenido en álcalis, lo cual conlleva riesgos para la salud de los trabajadores. Además, debido a esta elevada alcalinidad, no es conveniente emplearlos en obras con sulfatos o áridos reactivos, pues pueden producirse reacciones álcali-árido.

#### *2.3.2.3. Alkali-free*

A día de hoy, la tendencia en los distintos sectores de trabajo se dirige a rehuir cualquier técnica o material que pueda producir riesgos y consecuentemente daños, imponiendo esta prioridad incluso por encima de costes, facilidades o rendimientos de trabajo. Esto, ligado a las pérdidas de resistencias últimas producidas por el uso de acelerantes alcalinos han forzado al sector a desarrollar nuevos productos con mejores prestaciones en estos aspectos.

Los acelerantes libres de álcali son los más desarrollados recientemente. El contenido de álcalis es muy bajo en estos compuestos ( $< 1\%$  en equivalentes de  $\text{Na}_2\text{O}$ ) y su  $\text{pH}$  oscila entre 4 y 6, lo que hace que su manipulación sea más segura. Hasta el momento, se han introducido en el 20% de las obras ejecutadas en España con vía seca y en un 10% con vía húmeda.

Estos compuestos se encuentran formados básicamente por sulfato de aluminio. Los iones de aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ) y sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) del acelerante reaccionan con el  $\text{C}_3\text{A}$  y los iones de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) procedentes del cemento y del sulfato de calcio para formar etringita. Dado que

cada mol de etringita contiene 32 moles de agua, su formación aumenta la relación sólido/líquido reduciendo el tiempo de fraguado. El desarrollo de los cristales de etringita proporciona la ganancia inicial de la resistencia mecánica.

En contrapartida a las múltiples ventajas de estos acelerantes, cabe destacar que los valores de resistencia inicial son menores que los obtenidos con los acelerantes basados en aluminatos.

## **2.4. Ensayos de caracterización y control en hormigón proyectado**

Dada la importancia del hormigón proyectado en su amplio abanico de funciones, es sumamente importante la realización de ensayos que garanticen la calidad del producto final. Las exigencias y requerimientos, tanto mecánicos como de durabilidad, hacen preciso tener bien caracterizados y estudiados cada uno de los elementos implicados en la fabricación y colocación de los hormigones proyectados.

El control de calidad empieza con los ensayos previos realizados antes del comienzo de la obra. Éstos se realizan con el fin de conseguir una mezcla colocada en obra que cumpla con los requisitos especificados de evolución de resistencias, impermeabilidad, homogeneidad, adherencia al soporte, porcentaje de rebote, etc. Estos ensayos deberán realizarse en las instalaciones y con los materiales del hormigón definitivo.

Los ensayos de control tienen como finalidad comprobar que la ejecución de la proyección se lleva a cabo siguiendo las directrices especificadas.

Otros tipos de ensayo necesarios, cuando se requieran altas resistencias iniciales son los ensayos de control de endurecimiento. Éstos permiten comprobar que el hormigón gana resistencia según lo esperado, y si esto no es así, poder tomar medidas lo antes posible.

Los métodos de ensayo existentes se pueden dividir en ensayos indirectos o directos y su empleo dependerá de la edad del hormigón en el momento del ensayo.

### ***2.4.1. Ensayos indirectos***

Son empleados para determinar la resistencia a compresión a edades tempranas, cuando aún no es posible la extracción de testigos del paramento proyectado.

Los ensayos indirectos proporcionan medidas indirectas de la resistencia a compresión obtenidas a través de unas curvas de calibración. El valor absoluto de estos resultados no reproduce ningún valor de interés, si no pueden compararse con otros considerados de referencia, con el fin de poder decidir si la ganancia de resistencia va bien o si por el contrario debe rechazarse.

El rango de validez de estos ensayos está dentro de las primeras 48 horas, a partir de este tiempo es más eficaz el uso de métodos directos.

#### *2.4.1.1. Ensayo de penetración (UNE 83 603)*

En este ensayo, se mide la fuerza requerida para empujar una aguja de dimensiones definidas dentro del hormigón proyectado, empleándose un penetrómetro de aguja (figura 2.7). El valor máximo de resistencia para el cual es aplicable dicho ensayo es de aproximadamente 1,2 MPa.

Para determinar la resistencia a la penetración, se coloca la punta de la aguja en contacto con el material y en posición perpendicular a la misma. A continuación, se aplica de forma gradual una fuerza que haga que la aguja penetre en el material hasta la marca troquelada que ésta posee. La penetración debe realizarse en un tiempo de aproximadamente 10 segundos y la distancia entre penetraciones no será inferior a 13 mm.



*Figura 2.7 - Realización del ensayo de penetración con penetrómetro*

Con la media aritmética de los valores de penetración aceptados, se estima la resistencia a compresión por medio de gráficos en los que se relaciona la fuerza de penetración con resistencia a compresión para diferentes granulometrías de árido. En la figura 2.8 se muestran dos gráficos para diferentes granulometrías de árido. En el eje de abscisas encontramos la resistencia a compresión ( $\text{N/mm}^2$ ) mientras que en el eje de ordenadas encontramos la fuerza de penetración (kP). Tal y como se pudo observar, la resistencia es mayor para un mayor tamaño del árido.

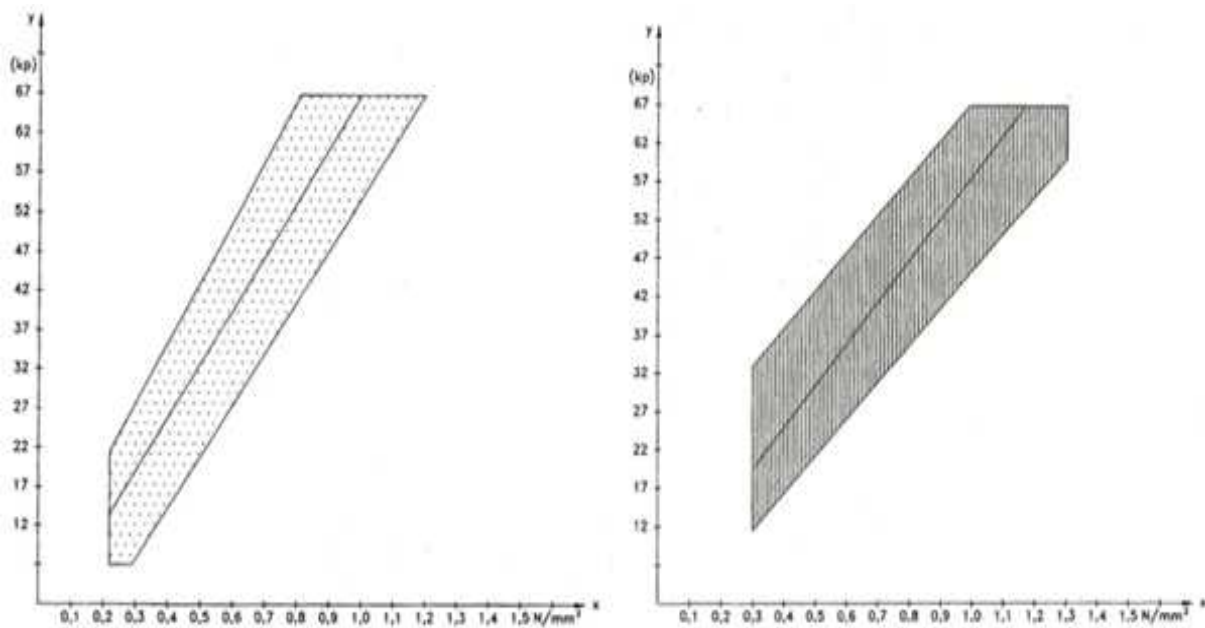


Figura 2.8 - a) Gráfico de relación Fuerza de penetración - Resistencia a compresión para un árido de 0-8 mm y b) Gráfico de relación Fuerza de penetración - Resistencia a compresión para un árido de 0-16 mm

#### 2.4.1.2. Ensayo de arrancamiento (UNE 83 604)

Para llevar a cabo este ensayo, se colocan elementos compuestos de mango y pasador, proyectándose sobre ellos hormigón; posteriormente son extraídos para medir la resistencia a cortante del material proyectado. Sin embargo, debido a las relaciones existentes, en las primeras edades, entre valores de resistencia a tracción, cortante y compresión, utilizando este método se obtienen unos valores muy aproximados de la resistencia a compresión del material. En consecuencia, hay que tener en cuenta la edad del hormigón en el momento del ensayo, pues los valores de las relaciones entre resistencia a cortante y a compresión están influenciados por dicha edad.

Este ensayo puede emplearse en morteros y hormigones proyectados, siempre que en estos últimos el tamaño máximo del árido no supere los 16 mm.

Como ya se ha comentado básicamente, el ensayo se basa en colocar bulones perpendiculares a la superficie de proyección y se coloca el hormigón proyectado. Con la ayuda de gatos, se ejerce un esfuerzo de tracción sobre el bulón hasta que se desprende arrastrando un tronco de cono de material proyectado. Al producirse el arrancamiento se anota la fuerza realizada (P) y se mide la altura media del tronco de cono extraído (H). Con estos dos datos se entra en un gráfico que acompaña al equipo y a través del cual se obtiene la resistencia a compresión estimada del material.

### **2.4.1.3. Ensayo de penetración-extracción (UNE 83 609)**

Para llevar a cabo este ensayo se colocan unos pernos dentro del hormigón para posteriormente extraerlos y medir la fuerza de extracción al arrancamiento. El parámetro para medir la resistencia es la relación entre la fuerza de extracción y la profundidad de penetración del perno.

Para poder realizar el ensayo, la edad del hormigón debe estar comprendida entre 2 y 48 horas. El espesor mínimo de material proyectado donde se puede aplicar el método dependerá de las especificaciones marcadas en el equipo utilizado, siendo el espesor de 10 cm el mínimo habitual.

El procedimiento para llevar a cabo el ensayo consta de tres fases. Una primera fase donde se realiza el hincado del perno, una segunda fase donde se extrae el mismo, y una tercera, en la cual se determina la resistencia a compresión.

A fin de obtener resultados fiables, deberán realizarse al menos ocho determinaciones, realizadas en una superficie no superior a 1 m<sup>2</sup>.

### **2.4.2. Ensayos directos**

Se realizan en hormigones de edades superiores a un día y el ensayo más convencional es la obtención de la resistencia a compresión mediante rotura de probetas testigo. Dichas probetas se extraen bien de la propia estructura o bien en paneles de ensayo proyectados específicamente para este fin.

Existen también otro tipo de ensayos directos como por ejemplo, la determinación del módulo de elasticidad sobre probetas. En el caso de añadir fibras a la mezcla, también suelen realizarse otros ensayos como el de resistencia a flexión y resistencia residual (ensayos de viga) y los ensayos de placa o energía de absorción.

Para la obtención de probetas, se emplean unos moldes en forma de artesa. Estos moldes, se proyectan perpendicularmente, estando colocado éste en posición horizontal, vertical o inclinada, dependiendo de la zona a ensayar. Una vez llenado el molde, se procede a retirar el material sobrante. Las muestras no deberán desmoldarse hasta transcurridas al menos 24 horas desde su fabricación. En la figura 2.9 se observan las artesas ya proyectadas con el hormigón y una muestra en la cual ya se han extraído los testigos. Una sonda tubular refrigerada por agua es la encargada de la extracción de los testigos. La operación de extracción es una operación delicada y el material no debe ser perturbado con el fin de evitar la pérdida de adherencia entre mortero y árido grueso.



Figura 2.9 - a) Moldes artesa para el ensayo de hormigón proyectado b) Obtención de testigos

Como ya se ha comentado anteriormente, la ejecución de estos ensayos dependerá de la edad del hormigón a la hora de ensayar. En la figura 2.10 se muestra el rango de utilización de estos ensayos en función de dicha edad.

**Regiones A y B :** Método del penetrómetro (< 8 horas)

**Región C:** Método de arrancamiento (6-48 horas)

Método de penetración-extracción (25-48 horas)

**Región D:** Probetas testigo (1-90 días)

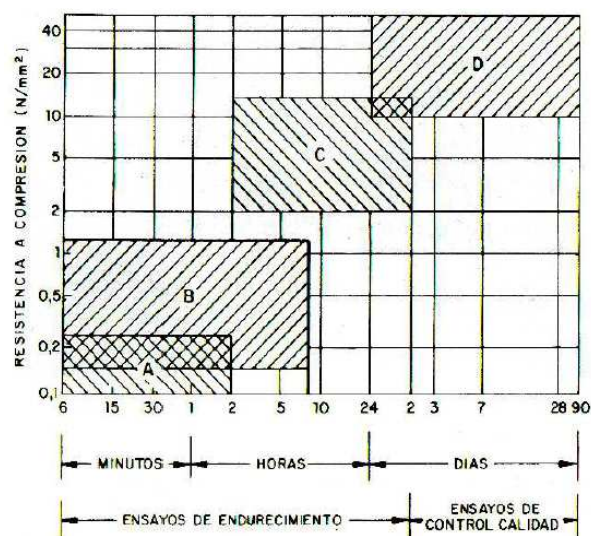


Figura 2.10 - Ejecución de ensayos de resistencia a compresión según edad del hormigón



## 2.5. Discusión

Si hacemos un análisis de la bibliografía analizada en este capítulo, podemos destacar como idea general que el hormigón proyectado es un material con grandes posibilidades, y como tal, debe seguir potenciándose.

Se han tratado los distintos sistemas de proyección y como conclusión, se puede extraer que la vía seca y la vía húmeda, no solo representan dos sistemas distintos, sino que, además, suponen diferencias significativas del hormigón como material, tanto en estado fresco como endurecido. Por lo general, se ha visto que la vía seca representa una mejor opción en superficies pequeñas o donde el proceso de proyección deba ser interrumpido con frecuencia. Sin embargo, la vía húmeda requiere de mayores superficies para obtener buenos rendimientos y permite unas mejores condiciones ambientales en la zona de trabajo, al no generar una cantidad tan grande de polvo.

Se ha hablado también de los distintos campos de aplicación en los cuales se viene empleando el hormigón proyectado. En la literatura repasada, se muestra un amplio abanico de aplicaciones, destacando entre éstas el sostenimiento y revestimiento de túneles como la principal en el uso del hormigón proyectado. Si bien, el hormigón proyectado constituye una técnica cada vez más versátil y que día a día amplía sus fronteras en referencia a sus aplicaciones.

Por lo que hace a componentes, los más recientes desarrollos se centran en los aditivos agregados a la mezcla y en especial en los compuestos acelerantes. El hecho de que con el paso del tiempo las directrices de seguridad y salud sean más estrictas, ha derivado en un desuso de los acelerantes basados en silicatos y aluminatos, siendo éstos parcialmente sustituidos por aditivos libres de álcalis. Además, éstos últimos también han conllevado mejoras en las características mecánicas del material, como por ejemplo, una reducción en la pérdida de resistencia última.

En referencia a los tipos de ensayos, la bibliografía encontrada hace referencia mayormente a ensayos de resistencias y se pueden dividir en indirectos y directos. Los indirectos se emplean en edades tempranas, mientras que los directos, que se basan básicamente en el ensayo de testigos, es posible realizarlos en edades a partir de 24 horas, cuando ya sea posible la extracción de los mismos. Al ser el hormigón proyectado un método relativamente moderno, no dispone de una normalización de ensayos, además, es difícil repetir las condiciones en un laboratorio. Esta falta de regulación en ensayos, es una vía de estudio importante, pues ofrece gran proyección de futuro.



## 3. ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA PREVIA PROPUESTA POR LA UPC

### 3.1. Introducción

Este capítulo tiene por objetivo el análisis de los métodos convencionales tradicionalmente empleados para la caracterización de los acelerantes en mezclas de mortero. Para poder alcanzar dicho objetivo, se realiza el estudio de campañas previas en este ámbito.

En etapas anteriores, se han realizado en la Universitat Politècnica de Catalunya diversos estudios con el fin de caracterizar la influencia de los aditivos acelerantes en hormigón proyectado. Para analizar dicha influencia, se han producido mezclas con varios tipos de acelerantes y distintas dosis, además, se han realizado ensayos a nivel de pastas de cemento, morteros y hormigón. No obstante, en el presente capítulo, solo se describen los estudios realizados a nivel de morteros <sup>(8)</sup>.

Los trabajos de laboratorio se han fundamentado en el estudio de evolución de la temperatura, resistencia a la penetración, densidad y porosidad, resistencia a flexión y a compresión. Los resultados de los ensayos de estas campañas anteriores, sirven como guía para nuevos estudios y serán comparados con los obtenidos en la campaña del siguiente capítulo.

### 3.2. Metodología

El estudio fue realizado en el Laboratorio de Estructuras Luis Agulló (Universitat Politècnica de Catalunya). Este laboratorio cuenta con todos los medios necesarios para la producción de las mezclas y el posterior ensayo de las mismas.

#### 3.2. 1. Materiales

##### Cemento

Se emplearon dos tipos de cemento: CEM I 52,5 R y CEM II/A-L 42.5 R, ambos indicados para hormigón proyectado entre otras funciones.

##### Agua, áridos y superplastificante

El agua empleada en las mezclas sigue las especificaciones incluidas en la normativa europea UNE-EN 1008-2007. El árido empleado, en concordancia con UNE-EN 12620:2003, se encuentran formado por arena de 0-4 mm.

El superplastificante Viscocrete 5940 fue empleado con el fin de mejorar la trabajabilidad de las mezclas. En la tabla 3.1 se muestran las principales características de este aditivo.

*Tabla 3.1. - Características del superplastificante*

Propiedad	Característica
Aspecto físico	Líquido marrón amarillento
Densidad a 20 °C	Aproximadamente 1.04 g/cm <sup>3</sup>
pH	Aproximadamente 5
Contenido en sólidos	Aproximadamente 37%

##### Acelerante

A continuación, en la tabla 3.2 se muestran los distintos acelerantes empleados y sus características.

Tabla 3.2. - Características de los acelerantes

Familia	Acelerante	Contenido sólidos (%)	Ratio molar $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{OH}^-]$	Ratio molar $[\text{Al}^{3+}]/[\text{OH}^-]$	Estabilizador	pH
1	AKF-125	38	0.6	0.8	Ácido inorgánico	3.3
	L53 AF	48	0.8	1.0	Ácido policarboxílico	3.1
2	AKF-80 AF	39	3.4	2.6	Silicato inorgánico	2.5
	AKF-70 AF	42	2.8	2.2	Silicato inorgánico	2.6
3	M2	30	3.0	2.5	Ácido policarboxílico	2.7
	M4	30	4.5	4.0	Ácido policarboxílico	2.7

Para el estudio de las familias 1 y 2 se emplearon tres dosis distintas (5, 7 y 9% spc). En la familia 3, las dosis estudiadas fueron dos (9 y 11% spc), según las indicaciones del proveedor.

### 3.2. 2. Composición de la mezcla

En la tabla 3.3 se muestran las cantidades de la mezcla utilizada en el estudio. La relación agua/cemento utilizada (0,45) y el contenido de aditivo superplastificante (1% spc) son valores típicos para hormigón proyectado. La cantidad de agua a añadir a la mezcla ha sido corregida teniendo en cuenta el agua procedente del superplastificante (2,81 g).

Tabla 3.3. - Mezcla de referencia

Materiales	Contenido (g)
Arena	1350
Cemento	450
Agua	199.7
Superplastificante	4.5

De la combinación de distintos parámetros surgieron treintaidós mezclas, las cuales se muestran en la tabla 3.4. La nomenclatura de éstas se encuentra formada por el nombre del acelerante , la dosis y el tipo de cemento. Todos los términos van separados por el símbolo "\_".

Tabla 3.4. - Mezclas de morteros

Familia	Tipo de acelerante	Dosis de acelerante (% spc)	Tipo de cemento	Referencia de la muestra
Familia 1	AKF-125	5	CEM II/A-L 42.5 R	AKF125_5_II42.5
		7		AKF125_7_II42.5
		9		AKF125_9_II42.5
		5	CEM I 52.5 R	AKF125_5_I52.5
		7		AKF125_7_I52.5
		9		AKF125_9_I52.5
	L53 AF	5	CEM II/A-L 42.5 R	L53 AF_5_II42.5
		7		L53 AF_7_II42.5
		9		L53 AF_9_II42.5
		5	CEM I 52.5 R	L53 AF_5_I52.5
		7		L53 AF_7_I52.5
		9		L53 AF_9_I52.5
Familia 2	AKF-80 AF	5	CEM II/A-L 42.5 R	AKF-80 AF_5_II42.5
		7		AKF-80 AF_7_II42.5
		9		AKF-80 AF_9_II42.5
		5	CEM I 52.5 R	AKF-80 AF_5_I52.5
		7		AKF-80 AF_7_I52.5
		9		AKF-80 AF_9_I52.5
	AKF-70 AF	5	CEM II/A-L 42.5 R	AKF-70 AF_5_II42.5
		7		AKF-70 AF_7_II42.5
		9		AKF-70 AF_9_II42.5
		5	CEM I 52.5 R	AKF-70 AF_5_I52.5
		7		AKF-70 AF_7_I52.5
		9		AKF-70 AF_9_I52.5
Familia 3	M2	9	CEM II/A-L 42.5 R	M2_9_II42.5
		11		M2_11_II42.5
		9	CEM I 52.5 R	M2_9_I52.5
		11		M2_11_I52.5
	M4	9	CEM II/A-L 42.5 R	M4_9_II42.5
		11		M4_11_II42.5
		9	CEM I 52.5 R	M4_9_I52.5
		11		M4_11_I52.5

### 3.2.3. Procedimiento de producción

Las mezclas se realizan según los pasos siguientes:

- 1) Se vierte el contenido de agua en la amasadora y se añade el superplastificante y posteriormente el cemento, agitando durante 30 segundos.
- 2) Se añade la arena durante los próximos 30 segundos con la amasadora encendida y se mezcla durante 30 segundos más.
- 3) Se deja reposar el mortero durante 90 segundos.
- 4) Se mezcla de nuevo durante 30 segundos.
- 5) Se añade el acelerante y se mezcla con la masa durante un máximo de 20 segundos.
- 6) Se coloca el mortero preparado dentro del molde sobre una mesa vibratoria y se compacta durante 10 segundos.

### 3.2.4. Ensayos realizados

La campaña experimental incluye ensayos a cortas y largas edades (tabla 3.5). En el siguiente capítulo se describen estos ensayos, los resultados de los cuales serán analizados y comparados con los del nuevo estudio en el quinto capítulo.

*Tabla 3.5. - Ensayos realizados*

Edad	Ensayo	Norma
Cortas edades	Evolución de temperatura (hasta 24h)	-
	Ensayo de penetración (hasta 2h)	UNE-EN 14488-2:2007
Largas edades	Densidad y porosidad (28d)	UNE-EN 1015-10
	Resistencia a compresión (0,5 ,1 ,7, 28, 60 d)	UNE-EN 196-1:2005
	Resistencia a flexión (0,5 ,1 ,7, 28, 60 d)	UNE-EN 196-1:2005

## 3.3. Resultados y conclusiones

### 3.3.1. Resultados

A continuación, se muestran algunos resultados de los ensayos realizados en esta campaña. A través de este estudio anterior, se obtuvo un amplio rango de datos para diversos ensayos, no obstante en este trabajo únicamente se muestran los referentes al ensayo de resistencia a flexión y resistencia a compresión. El motivo de ésto, es que son los referentes al criterio de resistencia y el que en gran medida determinará si un hormigón

proyectado es apto para su función. Otro hecho a destacar, es que solamente se exponen los resultados de muestras con el acelerante AKF-125, que será el empleado posteriormente en la nueva campaña.

### 3.3.1.1. Resistencia a flexión

A continuación, en la tabla 3.6, se muestran los resultados de los ensayos a flexión obtenidos para 0,5 días, 1 día, 7 días, 28 días y 60 días. En la figura 3.1 se muestra la evolución de resistencias, mientras que, en la figura 3.2 se muestra un diagrama de barras con los valores de los coeficientes de variación en cada tiempo y para cada una de las mezclas. Cabe destacar que se disponía de un total de tres probetas por muestra y por tiempo, por lo tanto se obtuvieron 3 valores para cada tiempo y muestra.

Tabla 3.6 - Valores promedio y coeficientes de variación para resistencias a flexión

Resistencia a flexión										
Mezcla	0.5 días		1 día		7 días		28 días		60 días	
	Resist. prom. (MPa)	CV (%)	Resist. prom. (MPa)	CV (%)	Resist. prom. (MPa)	CV (%)	Resist. prom. (MPa)	CV (%)	Resist. prom. (MPa)	CV (%)
AKF125_5_I 52.5	1.48	16.67	5.14	6.08	6.83	2.39	8.00	7.38	8.06	3.94
AKF125_7_I 52.5	1.54	5.13	4.38	2.53	6.63	4.14	7.83	13.54	6.31	6.50
AKF125_9_I 52.5	1.70	8.50	3.92	8.70	4.55	11.78	3.88	3.73	5.78	12.88
AKF125_5_II 42.5	1.66	5.42	3.69	8.57	7.20	39.38	6.73	12.17	6.86	1.70
AKF125_7_II 42.5	1.80	5.27	3.81	6.94	6.60	8.85	7.53	13.63	6.80	10.00
AKF125_9_II 42.5	1.49	5.47	2.38	6.63	4.78	17.74	6.27	9.14	6.18	2.85

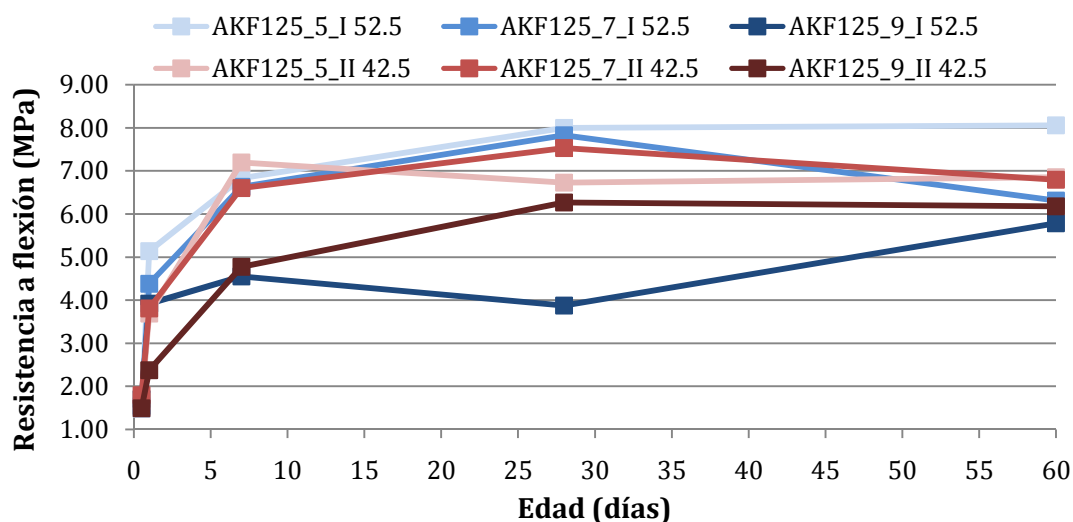


Figura 3.1 - Resistencias a flexión promedio



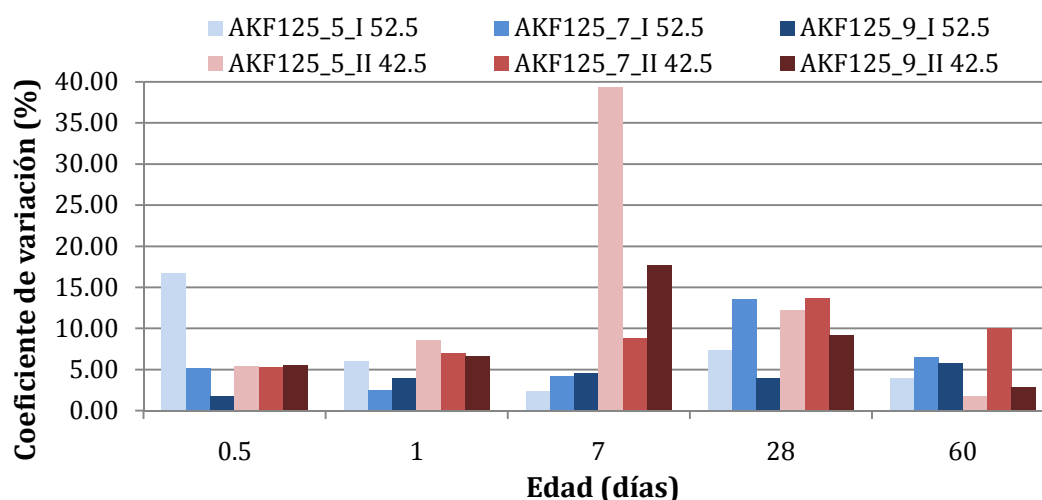


Figura 3.2 - Coeficientes de variación de resistencias a flexión

Según se observa, los valores de resistencia menores corresponden a las muestras con un 9%. Este fenómeno puede parecer contrario a lo esperado, sin embargo es totalmente lógico, pues una dosis mayor de acelerante implica una mayor formación de etringita en los primeros instantes. Ésto, dificulta la compactación de las muestras en el molde y da lugar a una probeta menos compacta y en consecuencia, menor es la resistencia obtenida.

Se puede ver además, que en el resto de dosis (5 y 7%) los valores son más elevados para las muestras ejecutadas con CEM II / A-L 42,5 R. Este cemento contiene filler calizo, el cual favorece en parte la formación de C-S-H y aportando así un ligero aumento en la resistencia.

Respecto a la variabilidad de los datos, existen varias mediciones entre un 10% y un 20% en valor del coeficiente de variación, llegando incluso alguna de éstas a valores cercanos a un 40%, valores de variabilidad muy elevados para un ensayo de este tipo.

### 3.3.1.2. Resistencia a compresión

En la tabla 3.7, se muestran los resultados de los ensayos a flexión para 0,5, 1, 7, 28 y 60 días. En la figura 3.3 se muestra la evolución de resistencias, mientras que, en la figura 3.4 se muestra un diagrama de barras con los valores de los coeficientes de variación en cada tiempo y para cada una de las mezclas. Cabe destacar que se disponía de un total de tres probetas por muestra y por tiempo, así pues teniendo en cuenta que cada rotura a flexión rompe la probeta en dos partes, se disponía de 6 resultados por muestra y tiempo para medir las variaciones presentadas.

Tabla 3.7 - Valores promedio y coeficientes de variación para resistencias a flexión

Mezcla	Resistencia a flexión									
	0.5 días		1 día		7 días		28 días		60 días	
	Resist. prom. (MPa)	CV (%)	Resist. prom. (MPa)	CV (%)	Resist. prom. (MPa)	CV (%)	Resist. prom. (MPa)	CV (%)	Resist. prom. (MPa)	CV (%)
AKF125_5_I 52.5	5.21	17.56	24.73	10.07	51.03	5.86	57.57	5.68	59.74	4.91
AKF125_7_I 52.5	7.54	7.51	18.44	20.61	44.05	3.58	50.18	11.23	42.26	12.35
AKF125_9_I 52.5	7.68	5.15	18.18	21.67	28.13	15.71	27.28	13.71	33.21	52.14
AKF125_5_II 42.5	6.15	12.82	15.73	3.95	40.06	3.95	40.38	2.63	53.13	6.71
AKF125_7_II 42.5	5.80	11.29	14.86	6.91	40.91	5.17	50.76	3.51	45.53	4.69
AKF125_9_II 42.5	4.74	9.95	8.84	25.97	29.76	9.14	39.71	7.61	40.17	13.40

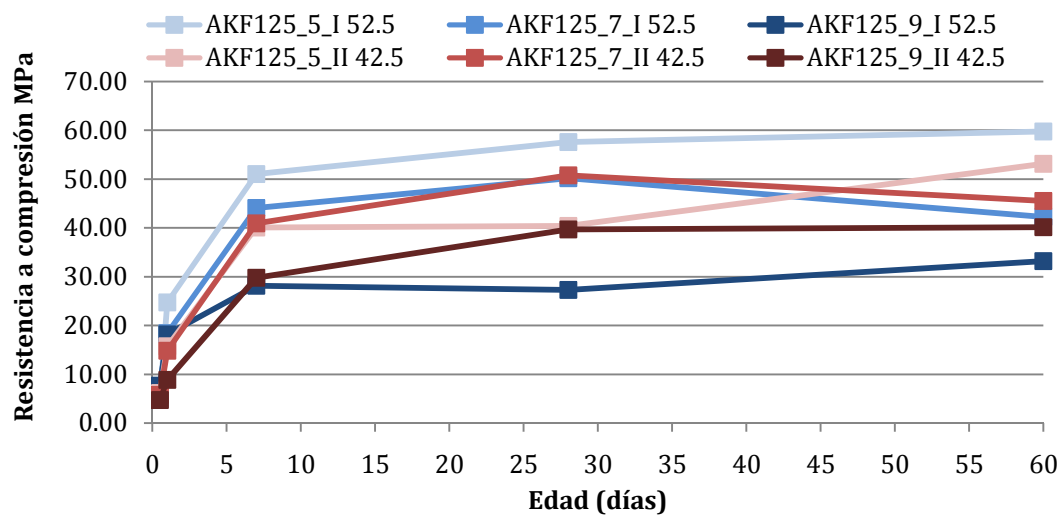


Figura 3.3 - Resistencias a compresión promedio

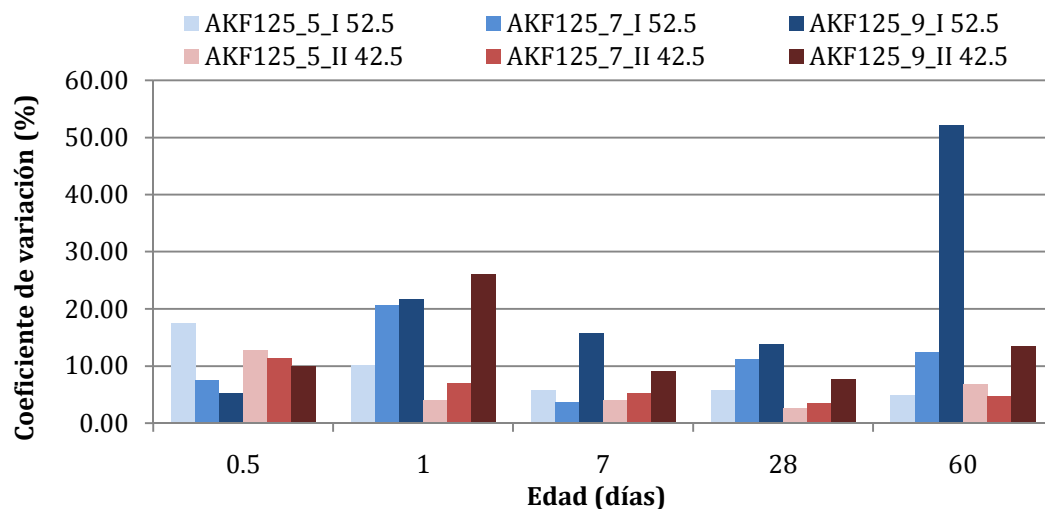


Figura 3.4 - Coeficientes de variación de resistencias a compresión

De la misma forma que en el ensayo a flexión, los valores de resistencia menores corresponden a las muestras con un 9%. Este fenómeno se corresponde con la pérdida de trabajabilidad fruto de la adición de una dosis elevada de acelerante que ya fue comentado en el punto anterior. Por el mismo principio, en edades de 60 días, se puede ver que las mayores resistencias se da para las mezclas con dosis de 5%, tanto para CEM I 52,5 R como CEM II/A-L 42,5 R.

Respecto a la variabilidad de los datos, existen varias mediciones entre un 10% y un 30% en valor del coeficiente de variación, llegando incluso alguna a valores a superar un 50%.

### **3.3.2. Conclusiones**

A continuación, se presentan las principales conclusiones obtenidas de este capítulo en referencia a los ensayos de resistencia a flexión y a compresión.

- El mayor aumento de la resistencia se produce durante los primeros 7 días, a partir de aquí, la pendiente del gráfico se reduce notablemente.
- Tanto en el ensayo de compresión como en el de flexión se muestra que las mezclas con dosis más elevadas son las que obtienen una menor resistencia. Este hecho tiene su explicación en la pérdida de trabajabilidad para dosis elevadas de acelerante durante el proceso de producción de las probetas.
- El coeficiente de variación para algunas mediciones en el ensayo de flexión y compresión es muy elevado, habiendo muchos valores por encima de un valor de 20%, llegando incluso a superar el 50%.

Esta última conclusión, conlleva la necesidad de plantear un estudio más profundo sobre el proceso de producción de morteros con acelerante de fraguado. Se considera necesario conocer con más profundidad que variables pueden conllevar estas altas variabilidades y de qué forma pueden reducirse. Es por esto que se plantea el estudio de las variables en el proceso de producción de morteros con acelerante de fraguado.



## 4. ESTUDIO PREVIO DE VARIABLES

### 4.1. Introducción

En el capítulo anterior, se estudió la influencia de diferentes aditivos acelerantes sobre mortero.. Para ello, se emplearon seis aditivos distintos: AKF-125, L53 AF, AKF-80 AF, AKF-70 AF (con dosis de 5, 7 y 9% spc), M2 y M4 (con dosis de 9 y 11% spc) y dos tipos de cemento (CEM I 52,5 R y CEM II/A-L 42,5 R).

Sin embargo, en dicha campaña, no se ha considerado el estudio de variables relacionadas con el proceso de producción de morteros, utilizándose en todas las mezclas realizadas el mismo tiempo y velocidad de amasado. Estas dos variables, son factores que pueden influenciar notablemente las características físicas y mecánicas finales del mortero. Otra variable a considerar en el estudio es el modo de adición del acelerante, concentrado o bien diluido con una parte del agua de amasado. Como se verá, esta variable también influye de manera notoria en el resultado final.

Estas variables junto a la dosis de acelerante, son las consideradas para llevar a cabo el estudio del presente capítulo, fin del cual es obtener un método de producción óptimo para morteros con aditivo acelerante de fraguado.

## 4.2. Metodología

La presente campaña se ha desarrollado en el Laboratorio de Estructuras Luis Agulló (Universitat Politècnica de Catalunya). Este laboratorio cuenta con todos los medios necesarios para la producción de las mezclas y el posterior ensayo de las mismas.

### 4.2.1. Materiales

#### Cemento

El cemento que se ha empleado es el CEM II/A-L 42.5 R, un tipo de cemento especialmente recomendado para hormigón proyectado entre otras funciones.

#### Agua, áridos y superplastificante

El agua empleada sigue las especificaciones incluidas en la normativa UNE-EN 1008:2007. El árido empleado, en concordancia con UNE-EN 12620:2003, se encuentra formado por arena de 0-4 mm.

El superplastificante Sikaplast T-1120 se emplea con el fin de mejorar la trabajabilidad de las mezclas. En la tabla 4.1 se muestran las características de este aditivo.

*Tabla 4.1. - Características del aditivo superplastificante*

Propiedad	Característica
Aspecto físico	Líquido marrón amarillento
Densidad a 20 °C	Aproximadamente 1.1 g/cm <sup>3</sup>
pH	Aproximadamente 4
Contenido en sólidos	Aproximadamente 34%

#### Acelerante

El acelerante utilizado en las mezclas es el AKF-125, un aditivo libre de álcalis. En la tabla 4.2 se detallan sus características más relevantes.

*Tabla 4.2. - Características del aditivo acelerante*

Propiedad	Característica
Aspecto físico	Disolución transparente de color beige
Densidad a 20 °C	Aproximadamente 1.37 g/cm <sup>3</sup>
pH	Aproximadamente 3.6
Contenido en sólidos	Aproximadamente 38%
Ratio molar [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]/[OH <sup>-</sup> ]	0.6
Ratio molar [Al <sup>3+</sup> ]/[OH <sup>-</sup> ]	0.8

Se han estudiado dos dosis distintas de acelerante: un 5 y un 7% sobre el peso de cemento. Además de estas dos cantidades, también se ha variado la forma de adición del aditivo: concentrado o diluido en un 10% del agua de amasado.

#### **4.2.2. Composición de la mezcla**

Los valores de referencia de la mezcla son los mismo que se emplearon en estudios anteriores (tabla 4.3).

*Tabla 4.3. - Mezcla de referencia*

<b>Materiales</b>	<b>Contenido (g)</b>
Arena	1350
Cemento	450
Agua	199.7
Superplastificante	4.5

En el caso de introducir en la mezcla el acelerante diluido, se restarán 20.25 g del agua de amasado, que serán los utilizados para la dilución del acelerante.

De la combinación de las distintas variables consideradas en el presente estudio surgieron dieciséis mezclas distintas, las cuales se describen en la tabla 4.4. La nomenclatura definida para las muestras está formada por el nombre del acelerante y su dosis (si está diluido se añade "+10"), el tipo de cemento empleado, el tiempo y la velocidad de amasado. Todos los términos van separados por el símbolo "\_".

Tabla 4.4. - Mezclas de morteros

Dosis de acelerante (% spc)	Modo de adición del acelerante	Tiempo de mezcla (s)	Velocidad de mezcla (rpm)	Referencia de la mezcla
5	concentrado	20	28.5	AKF125_5_II42.5_20s_28,5rpm
	diluido			AKF125_5+10_II42.5_20s_28,5rpm
7	concentrado			AKF125_7_II42.5_20s_28,5rpm
	diluido			AKF125_7+10_II42.5_20s_28,5rpm
5	concentrado	40		AKF125_5_II42.5_40s_28,5rpm
	diluido			AKF125_5+10_II42.5_40s_28,5rpm
7	concentrado			AKF125_7_II42.5_40s_28,5rpm
	diluido			AKF125_7+10_II42.5_40s_28,5rpm
5	concentrado	20	52	AKF125_5_II42.5_20s_52rpm
	diluido			AKF125_5+10_II42.5_20s_52rpm
7	concentrado			AKF125_7_II42.5_20s_52rpm
	diluido			AKF125_7+10_II42.5_20s_52rpm
5	concentrado	40		AKF125_5_II42.5_40s_52rpm
	diluido			AKF125_5+10_II42.5_40s_52rpm
7	concentrado			AKF125_7_II42.5_40s_52rpm
	diluido			AKF125_7+10_II42.5_40s_52rpm

#### 4.2.3. Procedimiento de producción

La consideración de nuevas variables en el presente estudio con respecto de los anteriores, ha modificado el proceso de producción que se empleaba hasta la fecha. Las mezclas se realizan siguiendo los pasos siguientes:

- 1) Se añade el cemento junto con el agua y se mezcla durante 30 segundos y a una velocidad de 28,5 rpm. El superplastificante se añade 10 segundos después del inicio de amasado.
- 2) Se añade la arena durante los próximos 30 segundos con la amasadora encendida y se mezcla durante 30 segundos más.
- 3) Se deja reposar el mortero durante 90 segundos.
- 4) Se mezcla de nuevo durante 30 segundos. Esta velocidad puede ser 28,5 o 52 rpm.
- 5) Se añade el aditivo acelerante (concentrado o diluido). Este tiempo puede ser 20 o 40 segundos y la velocidad será la misma que se haya empleado en el paso anterior.



- 6) Se coloca el mortero preparado dentro del molde sobre una mesa vibratoria y se compacta durante 10 segundos.

#### **4.2.4. Ensayos realizados**

##### Ensayo de penetración

La finalidad de llevar a cabo este ensayo fue principalmente evaluar las distintas variables en el proceso de producción de las muestras y escoger la combinación de las mismas que ofreciera valores más elevados de resistencia y menor variabilidad entre mediciones. Este ensayo ya fue descrito en el capítulo 2 del presente trabajo y en la figura 4.1 se muestra su ejecución.



*Figura 4.1 - a) Ejecución del ensayo de penetración y b) Molde con mortero ensayado*

Se realizaron mediciones cada 15 minutos contados a partir de la adición del acelerante en la mezcla y durante 2 horas. Al ser un ensayo indirecto, se toma como valor de resistencia, el valor promedio de 4 mediciones en cada uno de los tiempos. Es importante que exista una distancia mínima entre las distintas penetraciones, de esta forma se evita que las penetraciones ya existentes influyan sobre las nuevas. En la figura 4.2 se muestra el procedimiento de ensayo y uno de los moldes en los cuales ya ha sido realizado dicho ensayo. La punta empleada escogida para el ensayo tiene 9 mm de diámetro.

También se realizaron mediciones con el aparato Vicat (figura 4.2.a) con el fin de conocer los inicios y finales de fraguado de las distintas mezclas realizadas y de esta forma ayudar a conocer la mejor combinación de variables en el proceso de producción. Sin embargo, en este caso, no se obtuvieron buenos resultados, ya que para una dosis de 5% de acelerante, no se llegaron a obtener los valores de inicio de fraguado. Además, tal y como se puede observar en la figura 4.2.b, los resultados de este ensayo tenían una gran variabilidad sin una tendencia clara, principalmente debido a que el Vicat es un ensayo adecuado para pastas de cemento y no para morteros tal y como se ha empleado en este estudio.

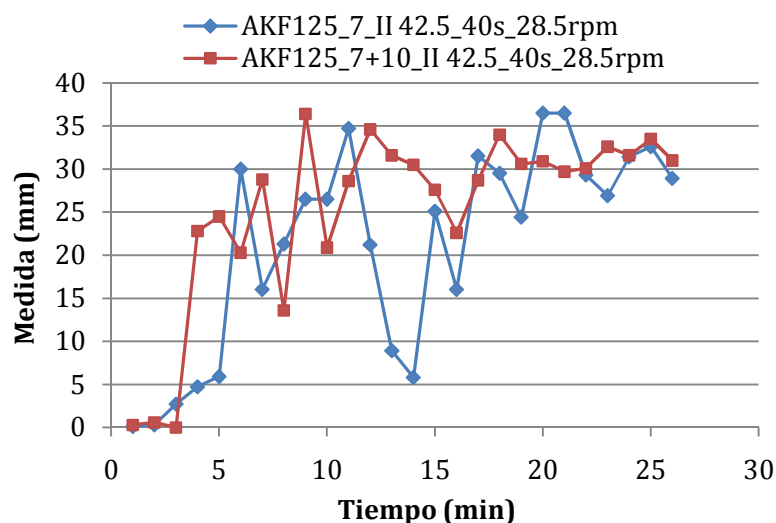


Figura 4.2 - a) Aparato Vicat y b) Ejemplo de resultados del ensayo con Vicat

### 4.3. Resultados y conclusiones

#### 4.3.1. Resultados

Los datos obtenidos mediante el ensayo de penetración han sido analizados con el fin de obtener un método de producción óptimo. Para ello, se ha estudiado cada una de las variables consideradas por separado, escogiendo así la combinación de éstas que ofrece mayores resistencias y menores dispersiones en los datos.

A continuación, en las tablas 4.4 y 4.5, se muestran para cada una de las mezclas, los valores promedio de resistencia y coeficiente de variación en cada uno de los tiempos.

Tabla 4.4. - Promedios y coeficientes de variación de resistencias en muestras con 5% de acelerante

Tiempo (min)	AKF125_5_II 42.5_20s_28.5rpm		AKF125_5+10_II 42.5_20s_28,5rpm		AKF125_5_II 42.5_20s_52rpm		AKF125_5+10_II 42.5_20s_52rpm	
	Resist. Promedio (MPa)	CV (%)	Resist. Promedio (MPa)	CV (%)	Resist. Promedio (MPa)	CV (%)	Resist. Promedio (MPa)	CV (%)
15	-	-	-	-	-	-	-	-
30	0.20	-	-	-	-	-	-	-
45	0.20	0.00	-	-	-	-	0.21	-
60	0.22	9.92	-	-	-	-	-	-
75	0.22	8.75	-	-	0.20	2.62	0.22	8.50
90	0.24	11.00	-	-	0.22	5.97	0.25	4.23
105	0.22	11.74	0.20	0.00	0.25	6.15	0.23	3.71
120	0.27	0.00	0.21	6.05	0.22	7.58	0.22	2.84

	AKF125_5_II 42.5_40s_28,5rpm		AKF125_5+10_II 42.5_40s_28,5rpm		AKF125_5_II 42.5_40s_52rpm		AKF125_5+10_II 42.5_40s_52rpm	
Tiempo (min)	Resist. Promedio (MPa)	CV (%)	Resist. Promedio (MPa)	CV (%)	Resist. Promedio (MPa)	CV (%)	Resist. Promedio (MPa)	CV (%)
15	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-
45	0.20	-	-	-	-	-	-	-
60	0.22	-	0.20	0.00	0.21	5.14	-	-
75	0.23	0.30	0.20	2.15	0.23	4.09	0.22	3.91
90	0.23	0.25	0.20	0.00	0.25	9.09	0.24	10.72
105	0.27	0.26	0.23	10.75	0.24	7.10	0.22	10.47
120	0.28	0.24	0.24	6.35	0.26	8.20	0.28	5.33

Tabla 4.5. - Promedios y coeficientes de variación de resistencias en muestras con 7% de acelerante

	AKF125_7_II 42.5_20s_28,5rpm		AKF125_7+10_II 42.5_20s_28,5rpm		AKF125_7_II 42.5_20s_52rpm		AKF125_7+10_II 42.5_20s_52rpm	
Tiempo (min)	Resist. Promedio (MPa)	CV (%)	Resist. Promedio (MPa)	CV (%)	Resist. Promedio (MPa)	CV (%)	Resist. Promedio (MPa)	CV (%)
15	-	-	-	-	-	-	0.24	9.80
30	0.21	4.25	0.21	3.51	0.21	4.61	0.28	9.24
45	0.23	9.68	0.23	6.56	0.23	5.04	0.29	7.30
60	0.27	2.72	0.28	8.99	0.26	7.57	0.36	12.72
75	0.29	4.24	0.30	9.68	0.29	9.48	0.38	14.82
90	0.32	2.29	0.32	16.30	0.33	11.42	-	-
105	0.32	4.56	0.39	8.24	0.34	2.54	0.46	5.56
120	0.40	3.61	0.41	12.15	0.37	1.03	0.48	2.97

	AKF125_7_II 42.5_40s_28,5rpm		AKF125_7+10_II 42.5_40s_28,5rpm		AKF125_7_II 42.5_40s_52rpm		AKF125_7+10_II 42.5_40s_52rpm	
Tiempo (min)	Resist. Promedio (MPa)	CV (%)	Resist. Promedio (MPa)	CV (%)	Resist. Promedio (MPa)	CV (%)	Resist. Promedio (MPa)	CV (%)
15	0.20	-	0.20	-	0.21	5.14	-	-
30	0.21	3.45	0.21	-	0.25	11.20	0.21	5.14
45	0.26	5.63	0.22	16.14	0.29	7.90	0.26	8.82
60	0.28	12.70	0.23	9.68	0.34	5.88	0.30	10.48
75	0.31	6.68	0.27	21.82	0.36	9.24	0.36	7.12
90	0.33	10.23	0.29	8.48	0.41	6.04	0.43	9.89
105	0.37	8.42	0.36	13.09	0.49	6.70	0.41	3.00
120	0.42	15.18	0.37	12.14	0.45	5.00	0.42	6.45

Los valores de las tablas se representan gráficamente en las siguientes figuras, separando las distintas variables, con el fin de poder analizar la influencia de cada una de ellas por separado.

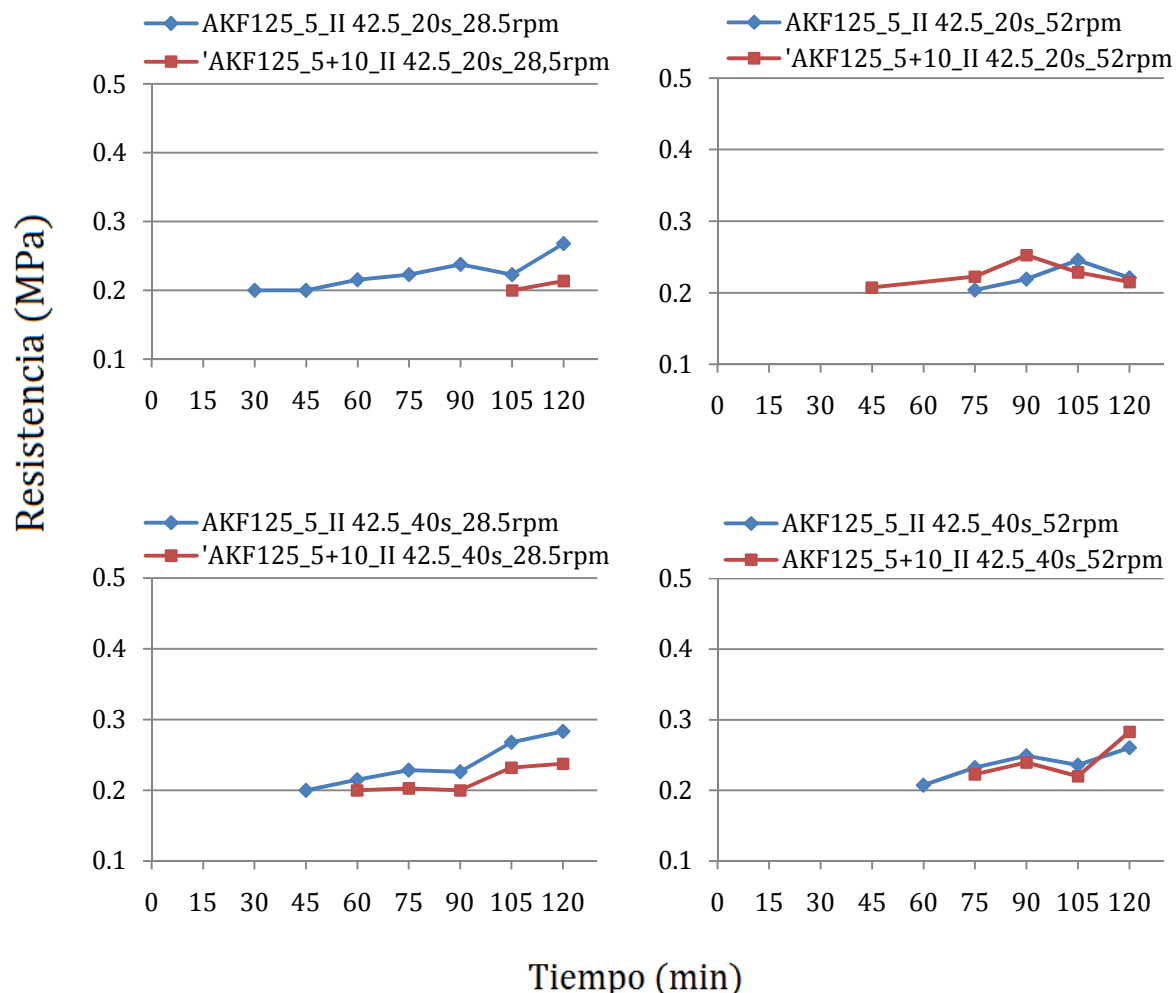
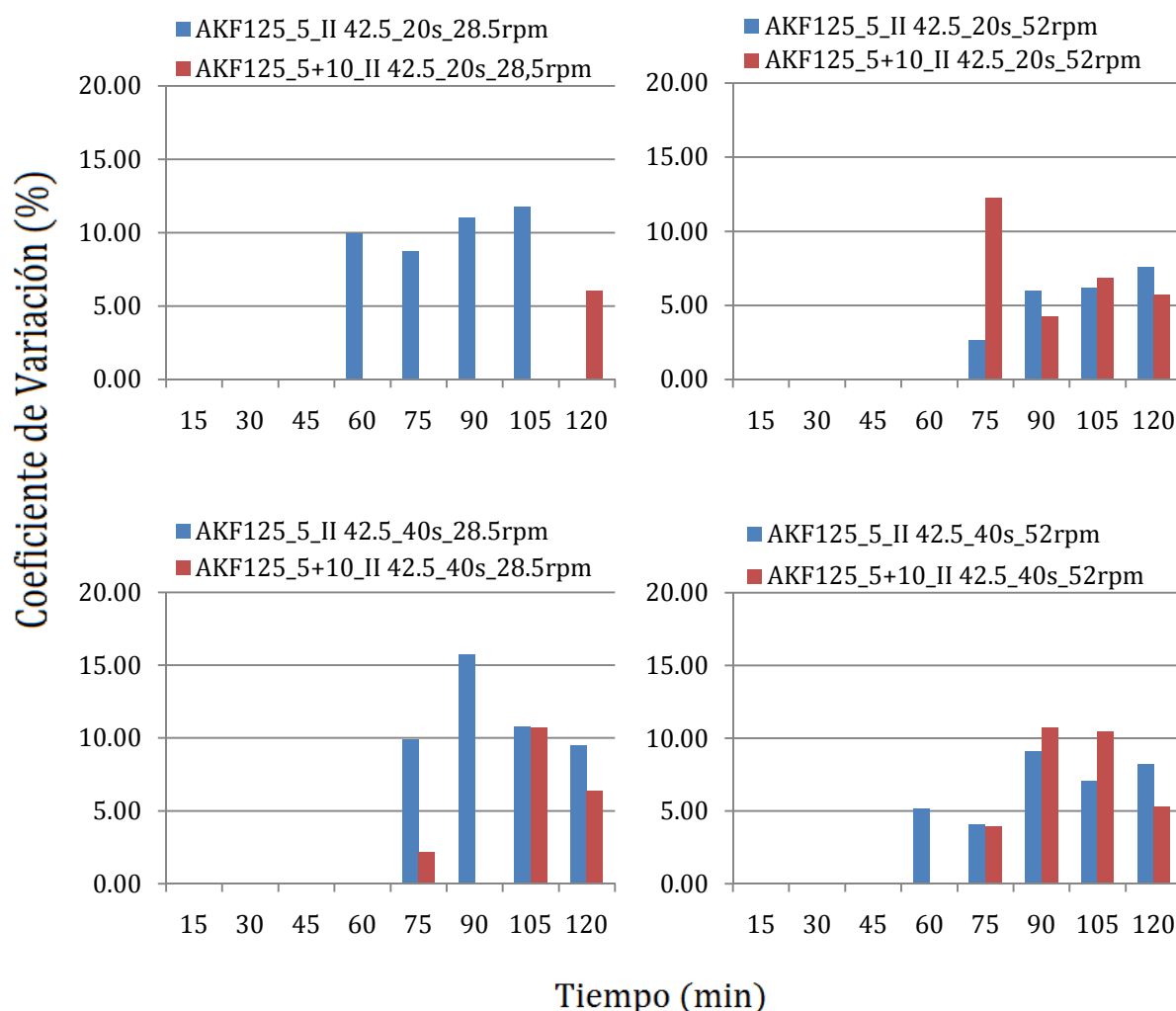


Figura 4.3 - Análisis de la influencia del modo de adición del acelerante en la resistencia para una dosis de 5% spc

En la figura 4.3 se muestra la evolución de resistencias de las muestras comparando entre mezclas en las cuales se ha añadido el acelerante en forma concentrada y en forma diluida. Se observa que, independientemente de que existan mediciones en las que no se ha alcanzado el valor mínimo en el ensayo de penetración (prácticamente hasta 45 minutos no se dispone de medición), la evolución de resistencia entre la muestra concentrada y la diluida sigue una misma tendencia. Además, se puede ver que los valores son mayores para el caso de aditivo concentrado, excepto en el gráfico para muestras ejecutadas con 20 segundos y una velocidad de 52 rpm, en el cual hasta 90 minutos esta tendencia es distinta. El valor promedio de resistencias para el caso concentrado es de 0,23 MPa, mientras que para el caso diluido este valor es de 0,22, así pues, no existen grandes diferencias en el análisis de este criterio.



*Figura 4.4 - Análisis de la influencia del modo de adición del acelerante en la variación y para una dosis de 5% spc*

En la figura 4.4 se muestran los coeficientes de variación de las muestras comparando entre mezclas en las cuales se ha añadido el acelerante en forma concentrada y en forma diluida. Antes que nada, cabe destacar que el hecho de no haber podido registrar medición en muchos de los tiempos iniciales, comporta que tampoco haya un valor del coeficiente de variación para esa medición con lo cual la posibilidad de análisis es menor. Como se puede ver, por lo general, los valores con un mayor coeficiente de variación son los correspondientes a las muestras con el aditivo añadido en forma concentrada. El valor promedio de coeficiente de variación para el caso concentrado es de 7,54 %, mientras que para el caso diluido, este valor es de 5,65 %.

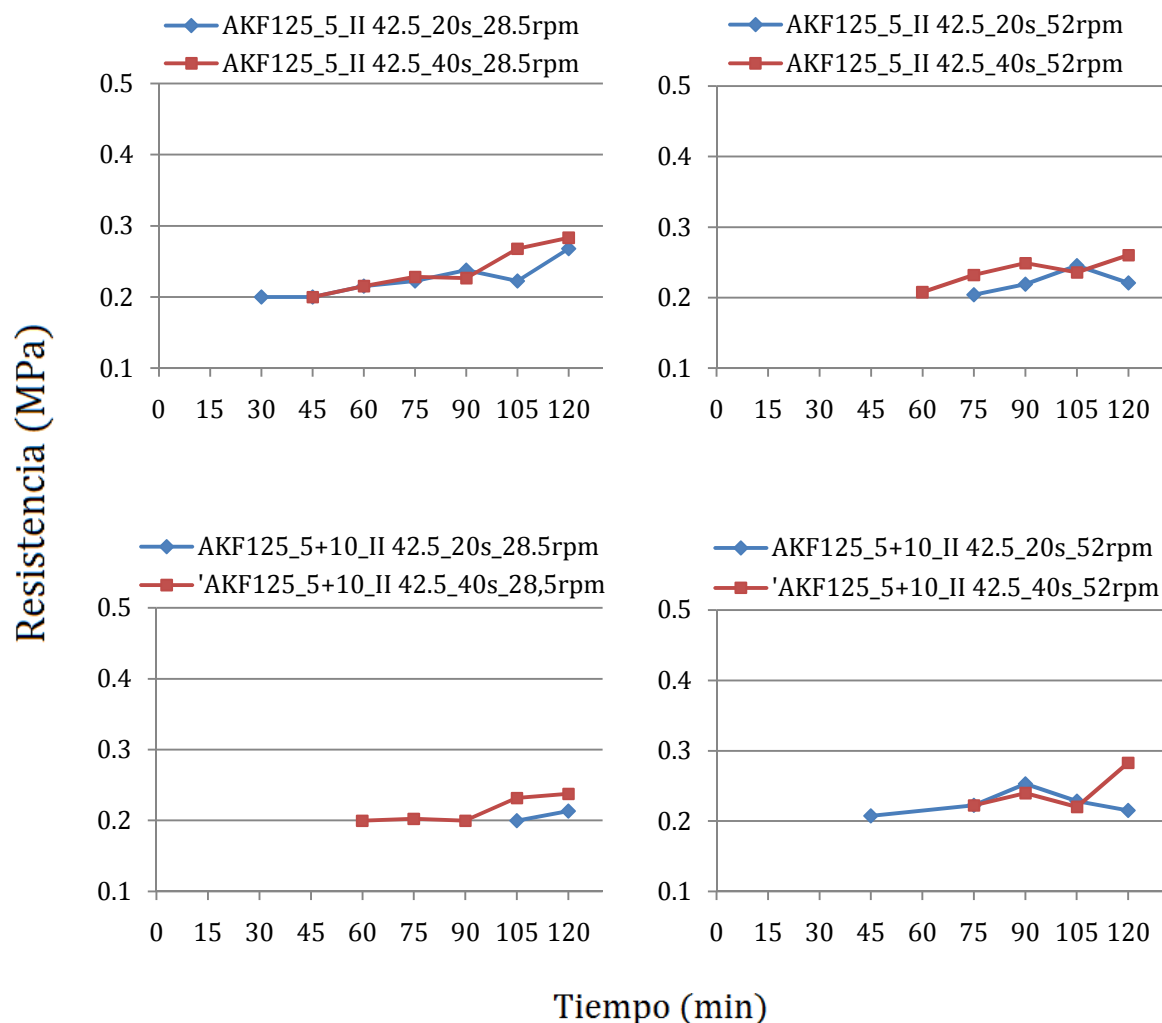


Figura 4.5 - Análisis de la influencia del tiempo de mezcla en la resistencia para una dosis de 5% spc

En la figura 4.5 se muestra el valor de resistencias de las muestras comparando entre mezclas elaboradas con un tiempo de mezcla de 20 segundos y con un tiempo de 40 segundos. En muchos de los tiempos no se dispone de valores superiores al mínimo exigido, aun así, puede observarse que la evolución de resistencia entre ambos tipos de mezcla sigue una misma tendencia. No obstante, estas tendencias suelen diferir a partir de los 90 minutos, algunas incluso a partir de 105 minutos. El valor promedio de resistencias para el caso de 20 segundos es de 0,24 MPa, mientras que para el caso con 40 segundos este valor es de 0,23, así pues, no existen diferencias sustanciales en el análisis de este criterio. En general, las muestras con un tiempo de mezcla de 40 segundos tienen resistencias mayores en los últimos tiempos.

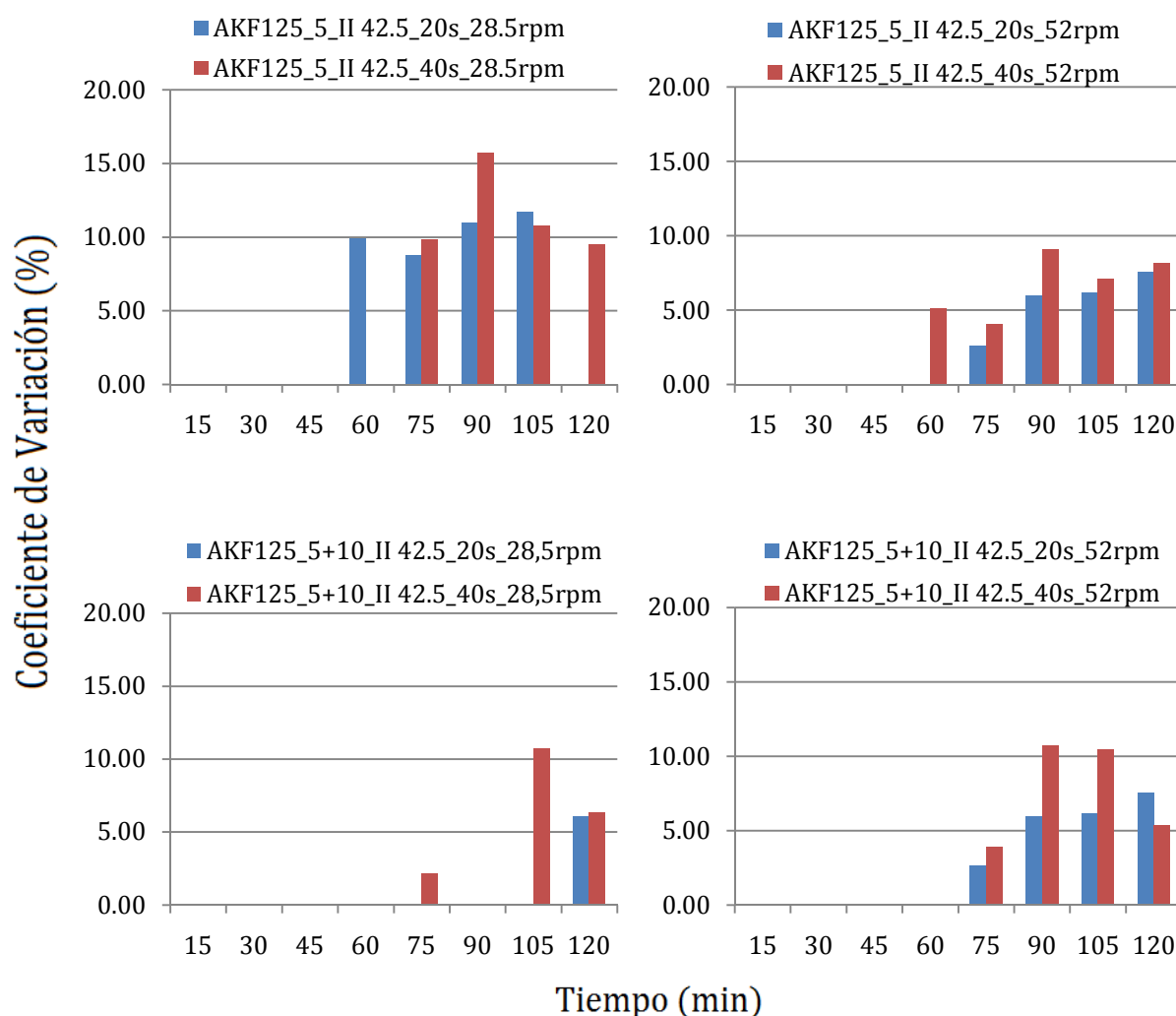


Figura 4.6 - Análisis de la influencia del tiempo de mezcla en la variación para una dosis de 5% spc

En la figura 4.6 se muestra el valor de coeficientes de variación de las muestras comparando entre mezclas elaboradas con un tiempo de 20 segundos y con un tiempo de 40 segundos. El valor promedio de coeficientes de variación para el caso de un tiempo de mezcla de 20 segundos es de 6,43 %, mientras que para el caso con 40 segundos son ligeramente superiores, con un valor de 7,18 %. Analizando estos valores, parece que la mejor opción para la producción de las muestras es un tiempo de 20 segundos. Se observa también que, en ambos casos, las variaciones mayores suelen aparecer en los últimos tiempos, en general para 90 y 105 minutos.

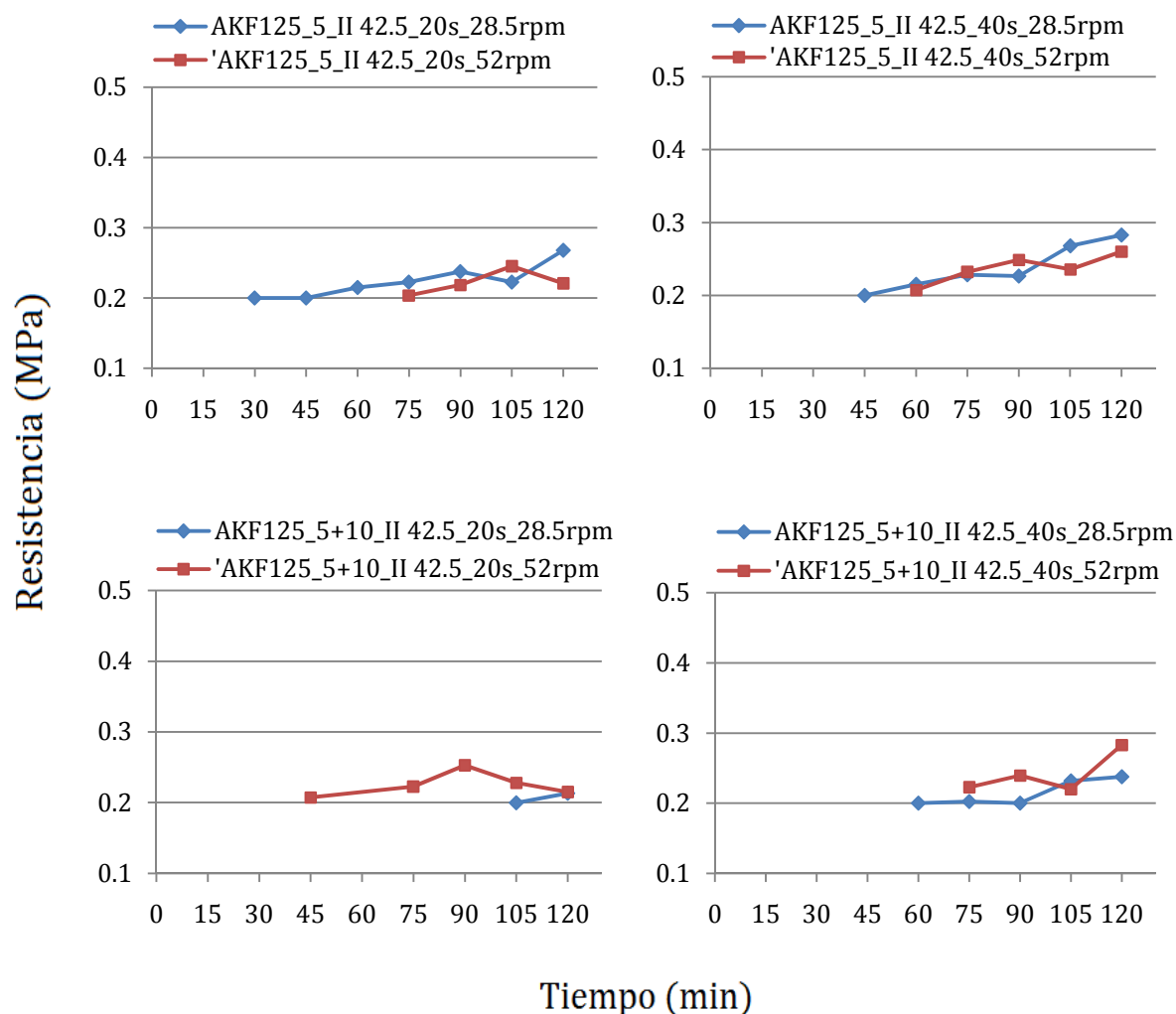


Figura 4.7- Análisis de la influencia de la velocidad de mezcla en la resistencia para una dosis de 5% spc

En la figura 4.7 se muestra el valor de resistencias de las muestras comparando entre mezclas realizadas con una velocidad de amasado de 28,5 rpm y una velocidad de 52 rpm. Observando los gráficos, no se puede afirmar de forma directa que una velocidad de amasado comporte grandes ventajas sobre la otra des del punto de vista de valores máximos de resistencia, es más, el valor promedio de resistencias para todos los tiempos es de 0,23 MPa en ambas velocidades. De la misma forma que se ha visto para el resto de variables estudiadas, una dosis de 5% dificulta el análisis, pues con esta cantidad de acelerante, la resistencia apenas supera el valor mínimo de 0,2 MPa. Para ofrecer un análisis más completo, es necesario aumentar la cantidad de acelerante, o bien realizar mediciones en tiempos mayores con el fin de dar la opción a que estas resistencias aumenten (esto también comportaría un aumento del número de datos, lo cual favorecería el análisis).



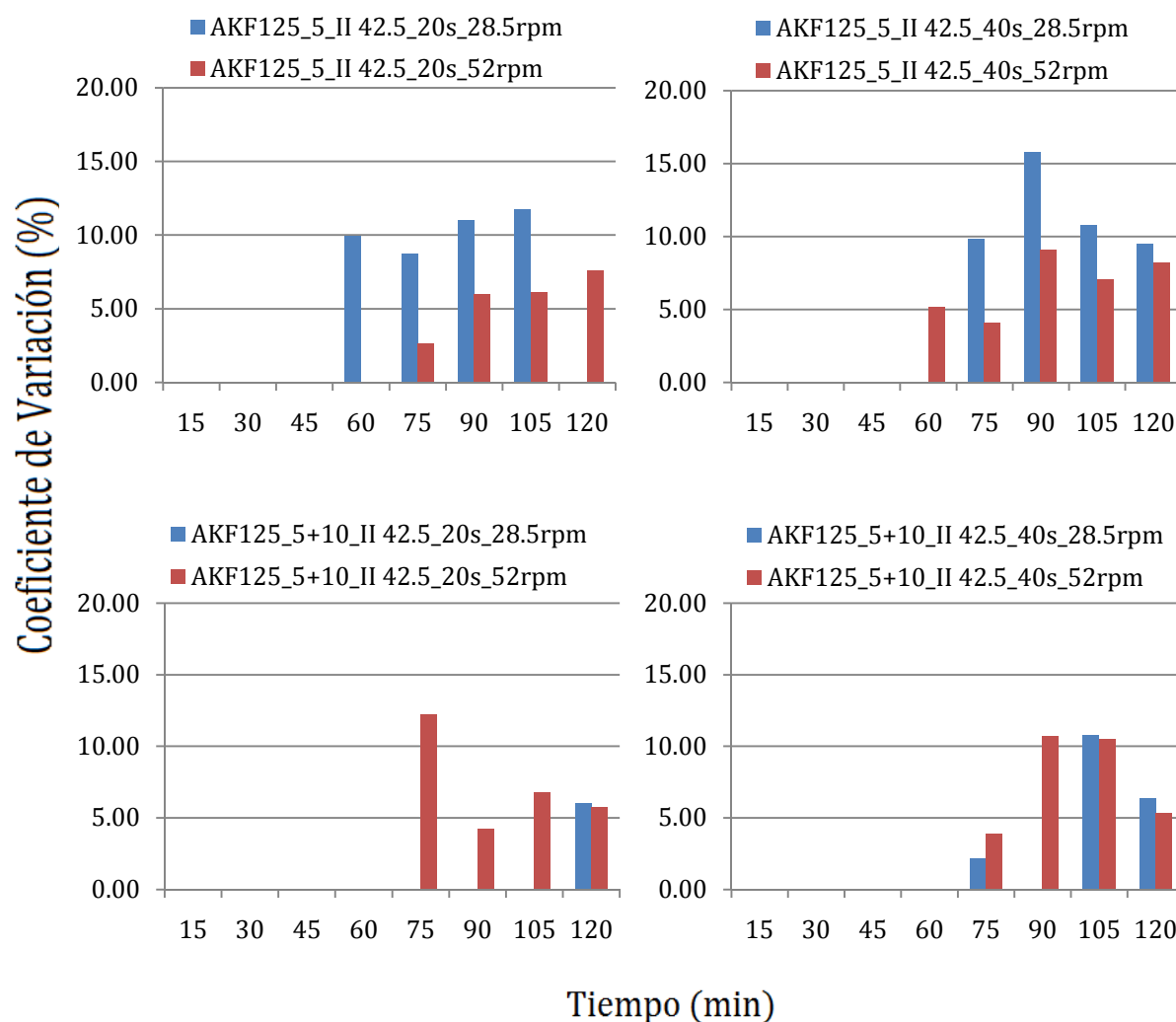


Figura 4.8- Análisis de la influencia de la velocidad de mezcla en la variación para una dosis de 5% spc

En la figura 4.8 se muestra el valor de coeficientes de variación de las muestras comparando entre mezclas realizadas con una velocidad de amasado de 28,5 rpm y una velocidad de 52 rpm. En este caso, si se observa especialmente los dos primeros gráficos, se ve que una velocidad mayor en la proceso de producción, implica una reducción del coeficiente de variación. El valor promedio de coeficientes de variación para el caso una velocidad de mezcla de 28,5 rpm es de 6,72 %, mientras que para el caso con 52 rpm son ligeramente superiores, con un valor de 6,78 %. Este resultado indica una mayor para variabilidad para una velocidad mayor (tendencia contraria a lo observado a primera vista en los dos primeros gráficos), no obstante hay que tener en cuenta que para muchos tiempos no existe medición en el caso de 28,5 rpm lo cual disminuye su promedio.

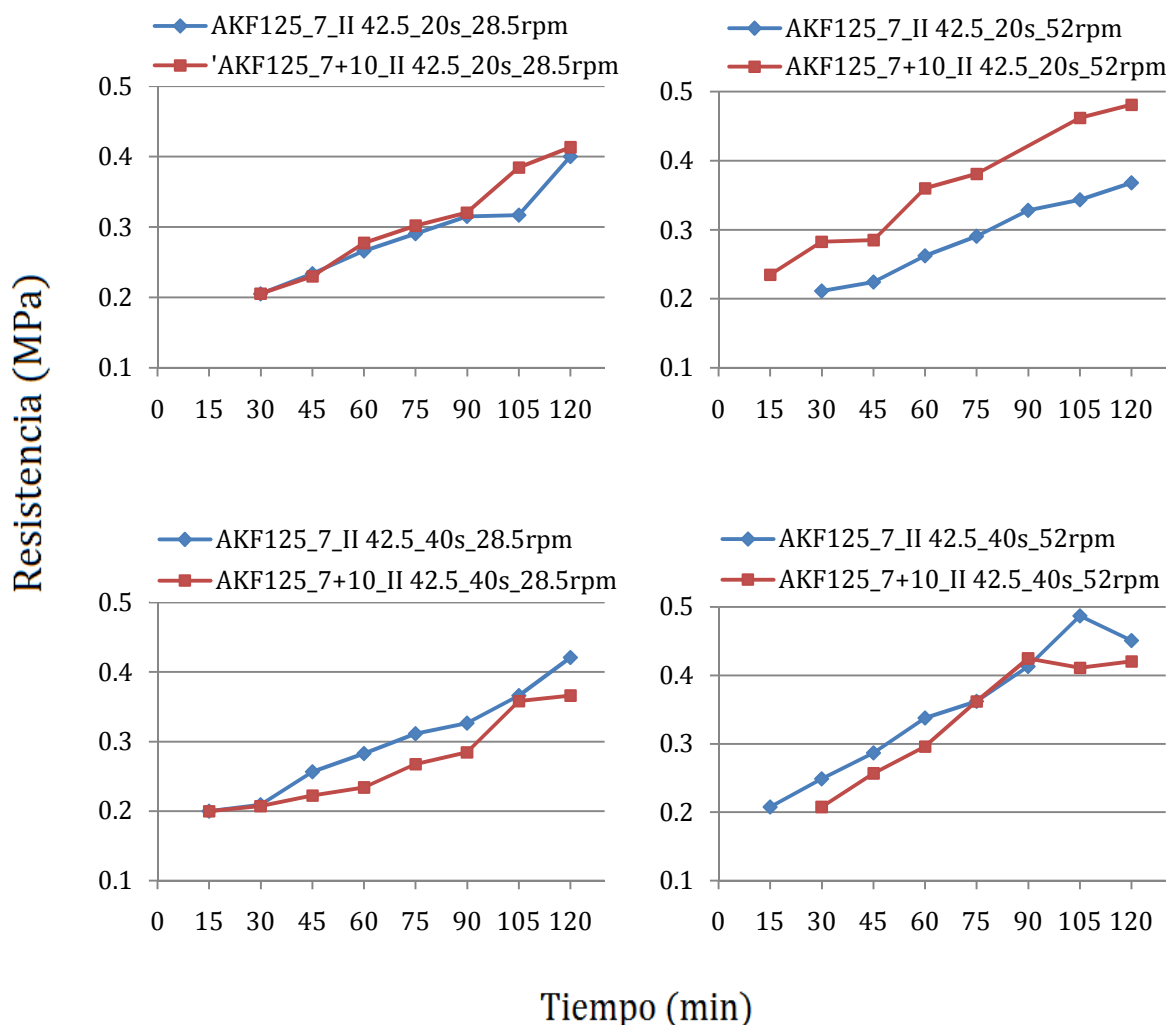
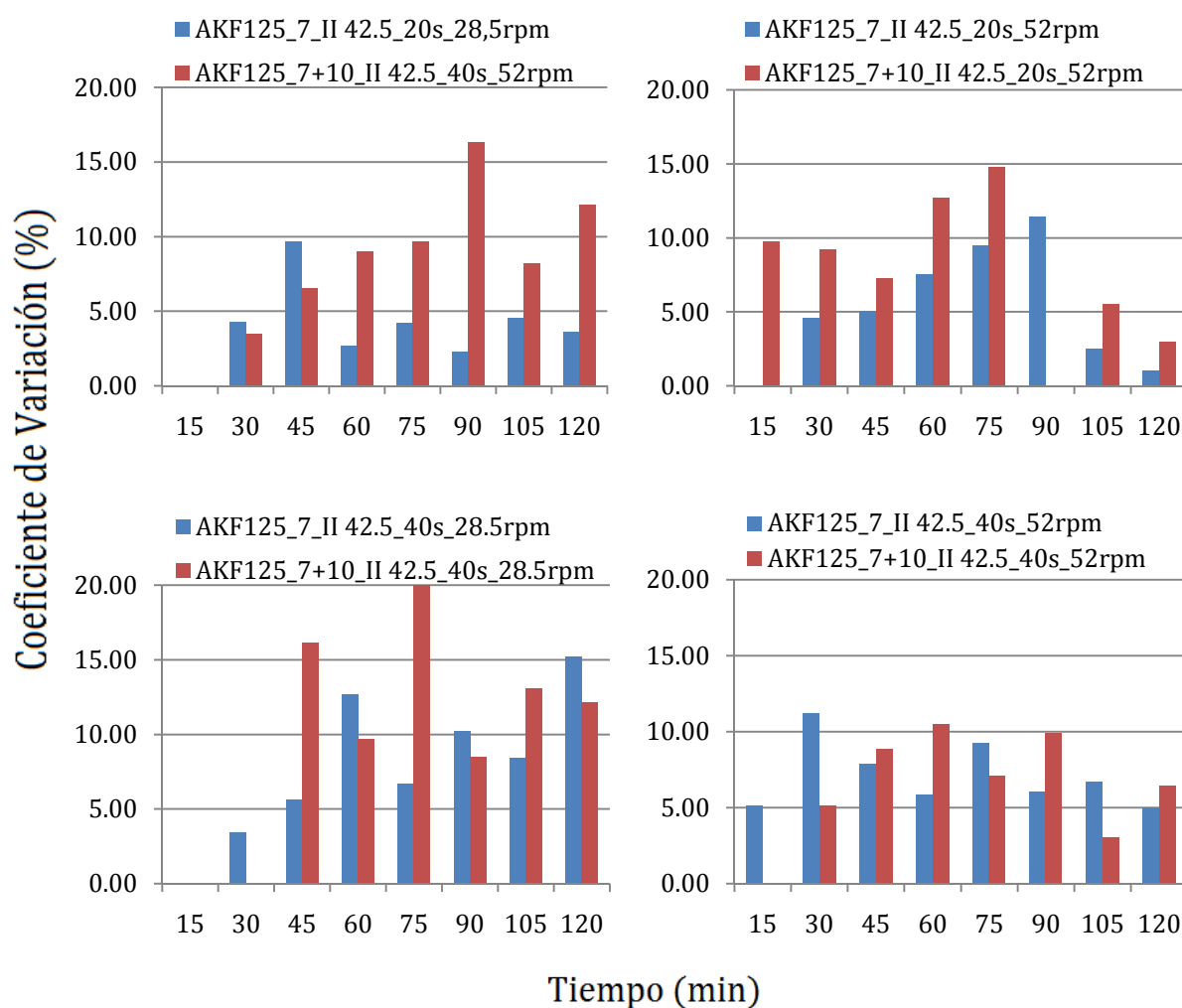


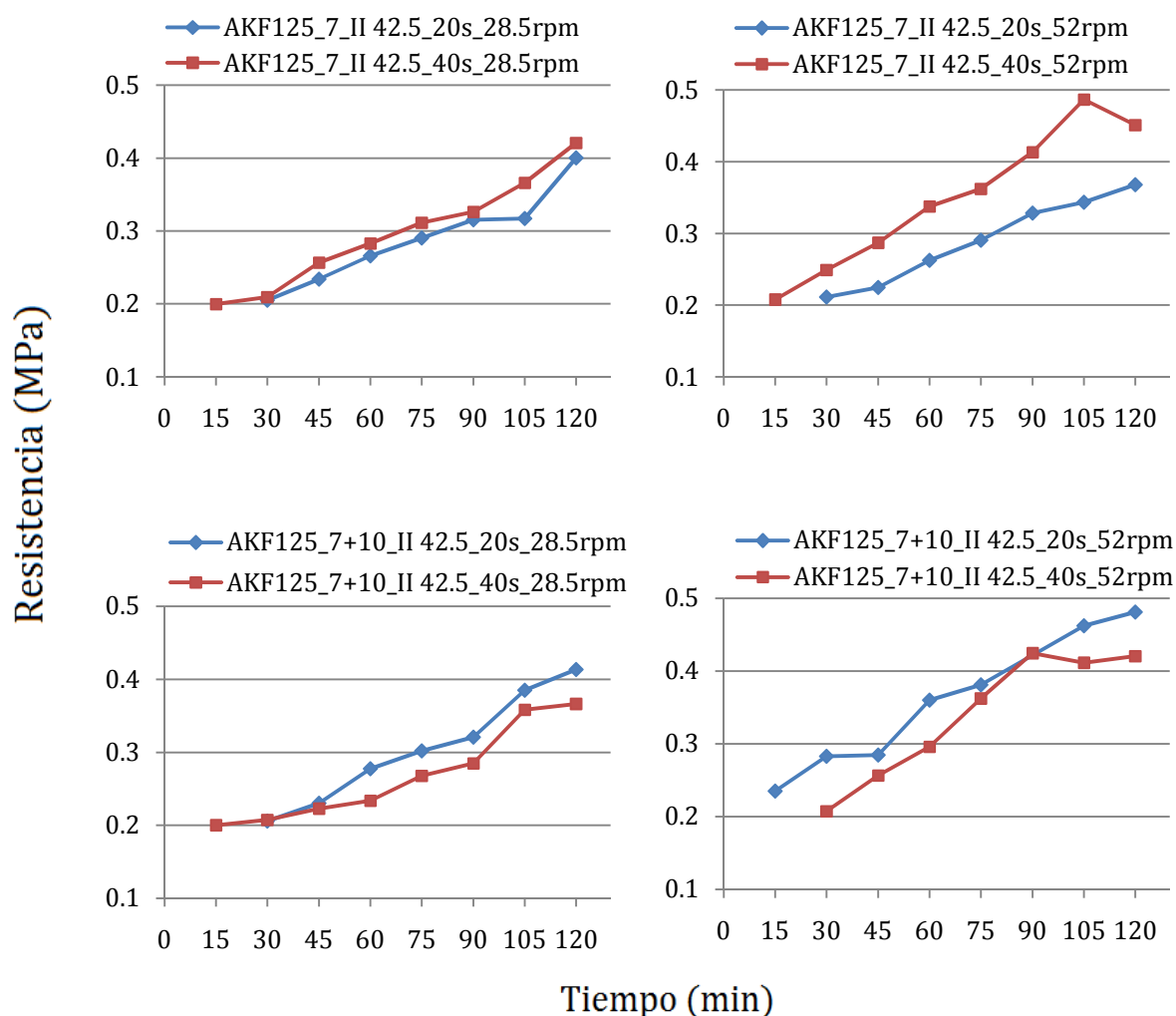
Figura 4.9 - Análisis de la influencia del modo de adición del acelerante en la resistencia para una dosis de 7% spc

En la figura 4.9 se muestra la evolución de resistencias de las muestras comparando entre mezclas en las cuales se ha añadido el acelerante en forma concentrada y en forma diluida. Si se observan los dos primeros gráficos las resistencias mayores se obtienen para las muestras en las cuales se ha añadido el acelerante diluido, mientras que, en los dos gráficos inferiores, sucede lo contrario. Según esto, se puede afirmar que el hecho de añadir el acelerante concentrado o diluido no conlleva grandes variaciones en la resistencia de las muestras, de hecho, el promedio de las resistencias para todos los tiempos con acelerante concentrado es de 0,30 MPa y para acelerante diluido 0,31 MPa, lo cual indica que no existen grandes ventajas de una velocidad frente a la otra.



*Figura 4.10- Análisis de la influencia del modo de adición del acelerante en la resistencia para una dosis de 7% spc*

En la figura 4.10 se muestran los coeficientes de variación de las muestras comparando entre mezclas en las cuales se ha añadido el acelerante en forma concentrada y en forma diluida. Como se puede ver, por lo general, los valores con un mayor coeficiente de variación son los correspondientes a las muestras con el aditivo añadido en forma diluida. El valor promedio de coeficientes de variación para el caso concentrado es de 6,63 %, mientras que para el caso diluido, este valor es de 9,63 %. Esta diferencia de 3% en el promedio de los coeficientes de variación, indica una clara mejora en la uniformidad de los datos en el caso de añadir el acelerante concentrado. El valor máximo de coeficiente de variación para el caso con acelerante concentrado se encuentra en 15%, mientras que para el caso con acelerante diluido, existen varios valores superiores a este 15 %, incluso superando en alguno el 20%.



*Figura 4.11- Análisis de la influencia del tiempo de mezcla en la resistencia para una dosis de 7% spc*

En la figura 4.11 se muestra el valor de resistencias de las muestras comparando entre mezclas elaboradas con un tiempo de mezcla de 20 segundos y con un tiempo de 40 segundos. Si se observan los dos primeros gráficos las resistencias mayores se obtienen para las muestras en las cuales se ha empleado un tiempo de mezcla de 40 segundos, mientras que, en los dos gráficos inferiores, sucede lo contrario. Según esto, se puede afirmar que el hecho de mezclar con 20 o 40 segundos no conlleva grandes variaciones en la resistencia de las muestras, de hecho, el promedio de las resistencias para todos los tiempos es de 0,31 en ambos casos, lo cual indica que no existen grandes ventajas de un método frente al otro en el estudio de este criterio.

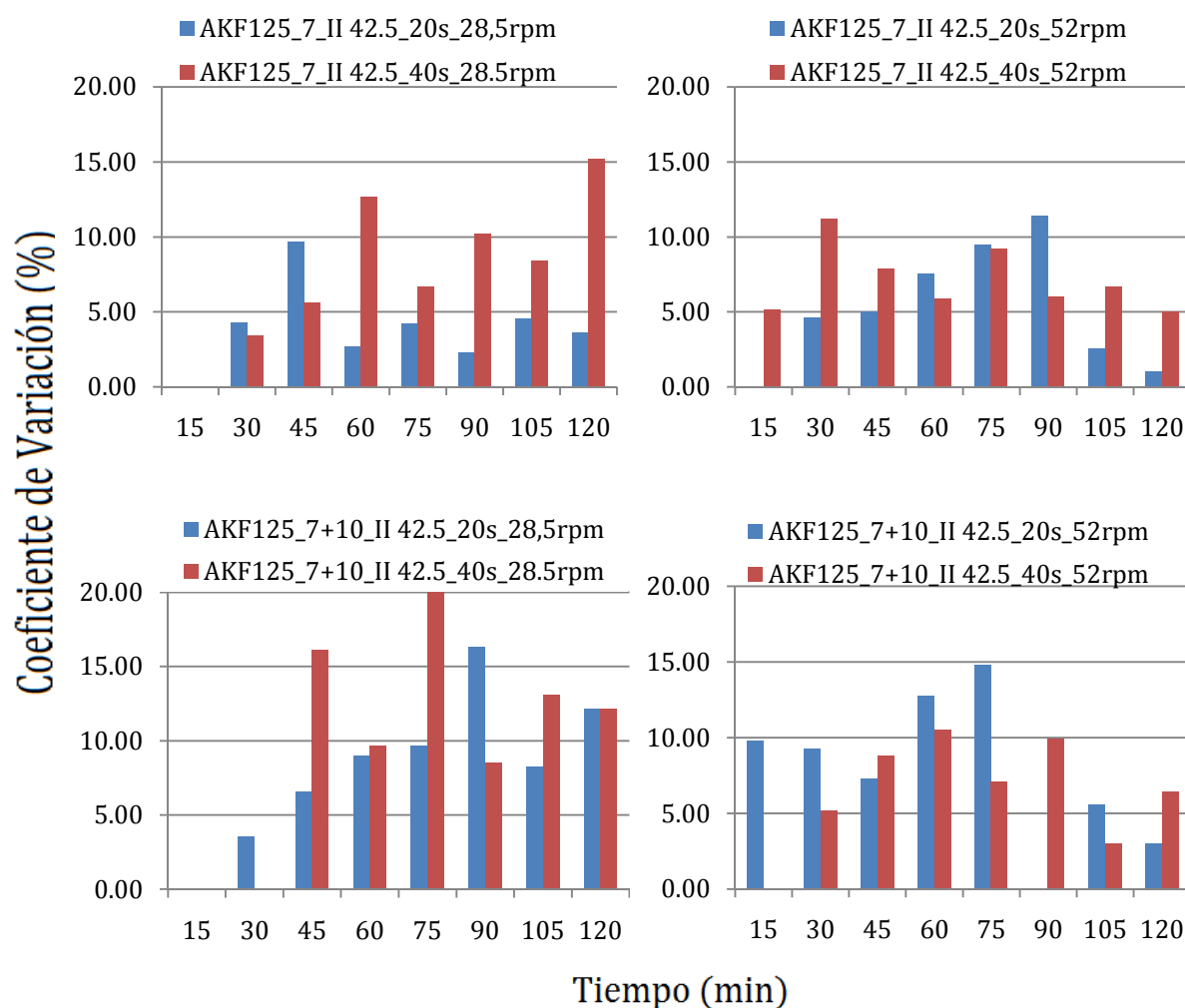


Figura 4.12- Análisis de la influencia del tiempo de mezcla en la variación para una dosis de 7% spc

En la figura 4.12 se muestra el valor de coeficientes de variación de las muestras comparando entre mezclas elaboradas con un tiempo de 20 segundos y con un tiempo de 40 segundos. Como se puede ver, por lo general, los valores con un mayor coeficiente de variación son los correspondientes a las muestras con un tiempo de mezcla de 40 segundos. El valor promedio de coeficientes de variación para este caso es de 8,98 %, mientras que para el caso de 20 segundos es de 7,17 %. Esta diferencia de casi un 2% en el promedio de los coeficientes de variación, indica una mejora en la uniformidad de los datos en el caso de mezclar durante 20 segundos. El valor máximo de coeficiente de variación para el caso con 20 segundos se encuentra en 16,3%, mientras que para el caso con 40 segundos, este valor es de 21,82%.

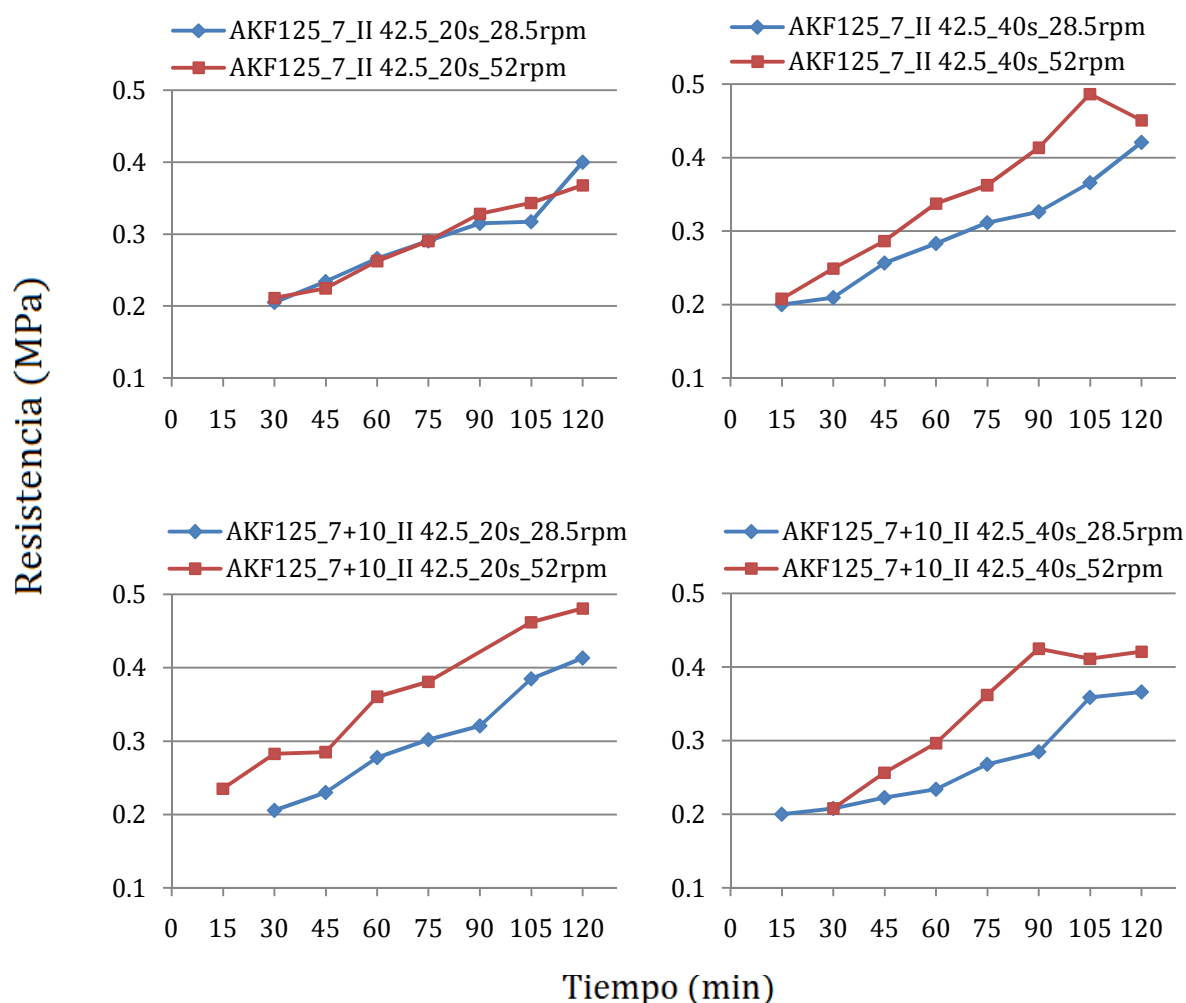


Figura 4.13 - Análisis de la influencia de la velocidad de mezcla en la resistencia para una dosis de 7% spc

En la figura 4.13 se muestra el valor de resistencias de las muestras comparando entre mezclas elaboradas con una velocidad de amasado de mezcla de 28.5 rpm y con una velocidad de 52 rpm. Si se observan todos los gráficos, se puede ver que en todos ellos los valores de resistencia para mezclas elaboradas con una velocidad de 52 rpm son mayores, llegando a ser en algunos casos la diferencia de 0,14 MPa entre mediciones de un mismo tiempo. El promedio de resistencias para el caso de 28,5 rpm es de 0,28 MPa y el valor máximo 0,42 MPa. Mientras, para el caso de 52 rpm el promedio es de 0,33 MPa y el valor máximo de 0,49 MPa. Así pues, las diferencias entre una velocidad y otra en el proceso de producción son considerables.

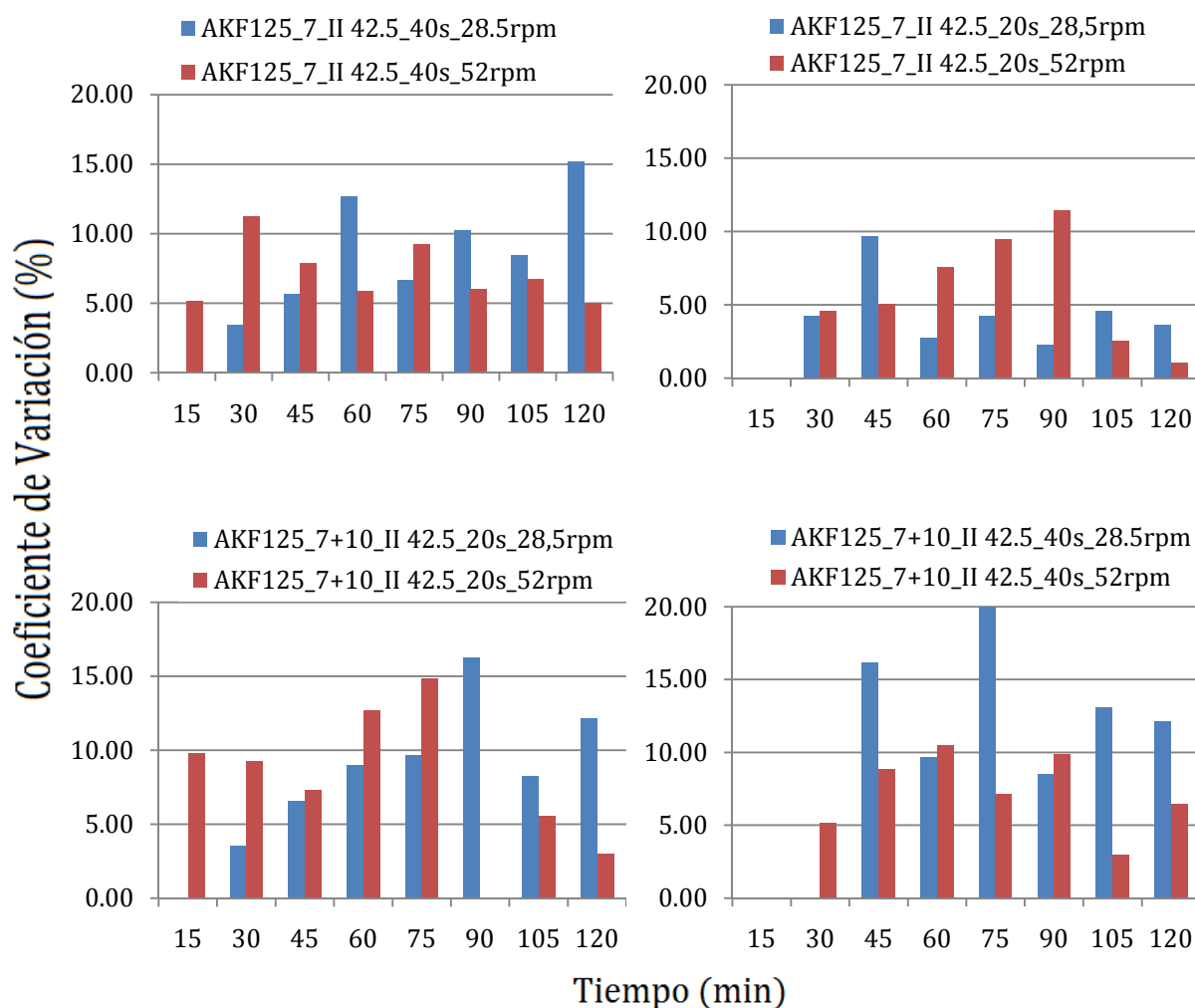


Figura 4.14 - Análisis de la influencia de la velocidad de mezcla en la variación para una dosis de 7% spc

En la figura 4.14 se muestra el valor de coeficientes de variación de las muestras comparando mezclas elaboradas con una velocidad de amasado de mezcla de 28.5 rpm y con una velocidad de 52 rpm. El valor promedio de coeficientes de variación para el caso de una velocidad de 28,5 rpm es de 8,90%, mientras que para el caso de 52 rpm es de 7,31 %. Esta diferencia en el promedio de los coeficientes de variación, indica una mejora en la uniformidad de los datos en el caso de mezclar durante utilizando una velocidad mayor. Observando los valores máximos, tenemos que en el caso de 28,5 rpm éste es de 21,81 %, mientras que en el caso de 52, el valor es de 14,81%.

### 4.3.2. Conclusiones

Como ya ha sido comentado, en el ensayo de penetración, los valores por debajo de 14 kP (lo que equivale a un valor de resistencia de la mezcla de 0,2 MPa) no deben ser considerados. Tal y como puede observarse en muchas de las mediciones realizadas, para muestras con 5% de acelerante (especialmente en el caso con el acelerante diluido), el valor no supera este mínimo, por lo cual no se dispone de un valor para poder llevar a cabo el análisis. Como solución a este problema en futuros estudios, en el caso de dosis bajas se plantea empezar la recogida de datos con un tiempo superior a 15 minutos desde la adición del acelerante. Por este motivo, se ha decidido escoger las mezclas realizadas con una dosis de un 7% para escoger el método óptimo de producción. A continuación, se analiza cada una de las variables por separado.

#### Dilución-No dilución

Desde un punto de vista de valores máximos de resistencia, no se observan grandes diferencias entre los dos modos de adición del acelerante. Así pues, este no parece ser un factor determinante en la elección de esta variable.

No obstante, añadir el aditivo en forma concentrada comporta una mejora muy notable en la variabilidad de los datos, llevando a coeficientes de variación inferiores respecto al modo de adición diluido. En la comparativa de los coeficientes de variación, se puede ver la clara mejora que implica el hecho de no diluir el acelerante desde un punto de vista de variabilidad de los datos (coeficientes de variación más bajos).

Estas variaciones tienen su justificación en que, en el modo de adición diluido, el hecho de eliminar una parte del agua de amasado para añadirla junto al aditivo, hace que la mezcla sea más heterogénea, surgiendo zonas con distinta relación a/c y en consecuencia una mayor variación de las resistencias.

Así pues, se considera que no diluir el acelerante es la mejor opción para la producción de mezclas.

#### Tiempo

Analizando el valor máximo de resistencias, se observa que en los casos con acelerante diluido, un tiempo de amasado menor implica valores mayores de resistencia. Mientras, para los casos con el acelerante añadido en forma concentrada, tiempos mayores son los que llevan a valores de resistencia más elevados. No obstante, ninguna de las dos opciones parece comportar una clara mejora respecto a la otra.

Analizando la variabilidad de los datos, se ha visto que un tiempo de amasado de 20 segundos conlleva unos coeficientes de variación menores, y en consecuencia, una mayor uniformidad de los datos.



Estas variaciones tienen su justificación en que un tiempo más largo de mezcla contribuye a romper algunas de las cadenas de etringita formadas una vez el acelerante es añadido en la mezcla. Esto conlleva una mezcla mas heterogénea y por tanto, una mayor variabilidad en los datos.

Teniendo en cuenta estas observaciones, se considera un tiempo de 20 segundos como la opción que ofrece unos mejores resultados en la producción de las mezclas.

### Velocidad

La velocidad es el factor que mayores cambios comporta en el resultado final de la mezcla. El aumento de velocidad a 52 rpm, conlleva valores de resistencia más elevados en todos los tiempos de toma de datos, aumentando hasta un 30% el valor respecto a una velocidad de 28,5 rpm para algunos de los tiempos medidos.

Además, una velocidad superior en el amasado también introduce mejoras en la variabilidad de los datos, aunque no en una forma tan determinante como en el caso de los valores máximos de resistencia (figura 4.14).

Estos resultados tienen su explicación en que una mayor velocidad de amasado conlleva una mayor reactividad del acelerante (más frecuencia en los choques entre partículas de aditivo y cemento, y por tanto, mayor probabilidad de que reaccionen). En consecuencia, los cristales de etringita se crean de una forma más homogénea.

Según lo observado, la mejor opción para la producción de las mezclas es una velocidad de 52 rpm.

### Conclusión final

Analizadas cada una de las variables por separado, parece claro que la combinación para el método de producción óptimo es no diluir el aditivo, aumentar la velocidad a 52 rpm y mantener un tiempo de 20 segundos en la segunda etapa del amasado.



## 5. ESTUDIO CON EL MÉTODO DE PRODUCCIÓN ESCOGIDO

### 5.1. Introducción

El objetivo de este capítulo es validar el método de producción escogido para la producción de mortero con acelerante, mediante la realización de diversos ensayos sobre muestras elaboradas con dicho método.

En primer lugar se expone la metodología utilizada, describiendo detalladamente las características de las muestras empleadas en cada uno de los ensayos. Seguidamente se describen los ensayos realizados, tanto en cortas como en largas edades y se exponen los resultados de los mismos. Por último, se muestran las conclusiones de los resultados y se describe la nueva metodología a seguir para la caracterización de acelerantes de fraguado en laboratorio con muestras de mortero.

## 5.2. Metodología

Para esta segunda parte del estudio y ya con un método óptimo de producción escogido, se han realizado nuevas mezclas con el fin de validar dicho método.

Los materiales empleados y su dosificación son los mismos que se utilizaron en el punto anterior. No obstante, en esta parte, algunas muestras han sido realizadas con CEM I 52,5 R. Las muestras utilizadas varían según el ensayo realizado, éstas pueden verse en las tablas 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4.

Para el ensayo de evolución de temperatura se han realizado cuatro muestras distintas (tabla 5.1). Además, se ha ensayado una nueva muestra como patrón de referencia, sin ninguna dosis de acelerante.

*Tabla 5.1 - Mezclas de morteros para ensayo de evolución de temperatura*

Dosis de acelerante (% spc)	Modo de adición del acelerante	Tiempo de mezcla (s)	Velocidad de mezcla (rpm)	Tipo de cemento	Referencia de la muestra
5	concentrado	20	28.5	CEM I 52,5R	AKF125_5_I52.5_20s_28,5rpm
			52		AKF125_5_I52.5_20s_52rpm
7			28.5		AKF125_7_I52.5_20s_28,5rpm
			52		AKF125_7_I52.5_20s_52rpm

Para estudiar la dispersión de los valores de resistencia, se han realizado más muestras con el fin de disponer de más resultados y poder realizar así un análisis más completo. No obstante, estas muestras solo han sido ensayadas mediante el ensayo de penetración (tabla 5.2). Como se puede observar en la tabla, estas muestras fueron realizadas únicamente con una dosis de 7% .

*Tabla 5.2 - Mezclas de morteros para ensayo de penetración*

Dosis de acelerante (% spc)	Modo de adición del acelerante	Tiempo de mezcla (s)	Velocidad de mezcla (rpm)	Tipo de cemento	Referencia de la muestra
7	concentrado	20	28.5	CEM I 52,5R	AKF125_7_I52.5_20s_28,5rpm
			52		AKF125_7_I52.5_20s_52rpm

Para realizar los ensayos de densidad y porosidad, las muestras utilizadas han sido las mismas que para el ensayo de temperaturas, con la única diferencia de que en este caso, el cemento empleado ha sido CEM II/A-L 42,5 R (tabla 5.3).

Tabla 5.3 - Mezclas de morteros para ensayo de densidad y porosidad

Dosis de acelerante (% spc)	Modo de adición del acelerante	Tiempo de mezcla (s)	Velocidad de mezcla (rpm)	Tipo de cemento	Referencia de la muestra
5	concentrado	20	28.5	CEM II/A-L 42,5 R	AKF125_5_I52.5_20s_28,5rpm
			52		AKF125_5_I52.5_20s_52rpm
7			28.5		AKF125_7_I52.5_20s_28,5rpm
			52		AKF125_7_I52.5_20s_52rpm

Para los ensayos de resistencia a flexión y compresión se realizaron muestras con ambos tipos de cemento (tabla 5.4).

Tabla 5.4 - Mezclas de morteros para ensayos de flexión y compresión

Dosis de acelerante (% spc)	Modo de adición del acelerante	Tiempo de mezcla (s)	Velocidad de mezcla (rpm)	Tipo de cemento	Referencia de la muestra
5	concentrado	20	28.5	CEM I 52,5 R	AKF125_5_I52.5_20s_28,5rpm
			52		AKF125_5_I52.5_20s_52rpm
7			28.5		AKF125_7_I52.5_20s_28,5rpm
			52		AKF125_7_I52.5_20s_52rpm
5	concentrado	20	28.5	CEM II/A-L 42,5 R	AKF125_5_II42.5_20s_28,5rpm
			52		AKF125_5_II42.5_20s_52rpm
7			28.5		AKF125_7_II42.5_20s_28,5rpm
			52		AKF125_7_II42.5_20s_52rpm

### 5.2.1 Ensayos realizados

Se realizaron ensayos en cortas y largas edades con el fin de comparar sus resultados con los de campañas anteriores. De esta forma, se pretende mostrar las variaciones de resultados introducidas por el nuevo método de producción de morteros. Los ensayos realizados se muestran en la tabla 5.5.

Tabla 5.5 - Ensayos realizados

Edad	Ensayo	Norma
Cortas edades	Evolución de temperatura (hasta 24h)	-
	Ensayo de penetración (hasta 2h)	UNE-EN 14488-2:2007
Largas edades	Densidad y porosidad (28d)	UNE-EN 1015-10
	Resistencia a compresión (1,7, 28 d)	UNE-EN 196-1:2005
	Resistencia a flexión (1,7, 28 d)	UNE-EN 196-1:2005

### Evolución de temperatura

Las temperaturas de los procesos exotérmicos debidos a la hidratación del cemento se determinan introduciendo una sonda termopar tipo K en un volumen de las mezclas y mediante un registro continuo en el tiempo de la temperatura. En la figura 5.1.a, se muestra uno de los termopares junto al equipo de adquisición de datos, el cual trabaja conjuntamente con un software que es el encargado de configurar, analizar y visualizar las mediciones realizadas. El mortero se introduce en un molde de polietileno, que aísla la muestra del exterior y permite la realización de un ensayo cuasi-adiabático. En la figura 5.1.b se muestra el molde con una de las muestras y el termopar en su interior.



*Figura 5.1- a) Termopar y aparato de registro b) Molde de polietileno con una de las muestras*

### Ensayo de penetración

Este ensayo fue descrito en el Capítulo 2 (Estado del arte) y se ha sido realizado bajo las directrices de la normativa UNE-EN 14488-2:2007 <sup>(9)</sup>. En este caso, los moldes empleados son de mayor tamaño, con el fin de realizar un mayor número de penetraciones y poder realizar así un buen análisis de la variación.

### Densidad y porosidad

La densidad ( $\rho$ ) y la porosidad ( $p$ ) del material se ha realizado siguiendo las directrices de la normativa UNE-EN 1015-10 <sup>(10)</sup>. Primero, las muestras con edad de 28 días se introducen en agua durante un mínimo de 48 horas con el fin de saturarlas. A continuación se mide su peso mediante una balanza hidrostática ( $w_h$ ). Se secan las muestras superficialmente y a continuación se pesa de nuevo en una balanza convencional, obteniéndose así su peso en condiciones saturadas ( $w_{sat}$ ). A continuación, se introducen las muestras en un horno hasta desecarlas y finalmente, se vuelven a pesar en balanza convencional con el fin de obtener su peso seco ( $w_d$ ). Los tres pesos obtenidos, a través de las formulas 4.1 y 4.2, permiten obtener la densidad y la porosidad de las muestras respectivamente.

$$\rho = \frac{w_d}{w_{sat} - w_h} \quad (5.1)$$

$$p = \frac{w_{sat} - w_d}{w_{sat} - w_h} \quad (5.2)$$

### Resistencia a flexión

La determinación de la resistencia a flexión en morteros se ha realizado según la norma UNE EN 196-1 <sup>(11)</sup>. Primeramente se ensayan las probetas prismáticas (40 x 40 x 160 mm) mediante flexión con una velocidad de carga de 0.05 kN/s. A continuación, se realiza el ensayo de compresión sobre los dos semiprismas rotos obtenidos del ensayo a flexión y con una velocidad de carga de 2.4 kN/s. En la figura 5.2 se muestra el momento de la ejecución de ambos ensayos.



*Figura 5.2- a) Ensayo a flexión b) Ensayo a compresión*

La resistencia a flexión,  $R_f$ , en megapascuales, se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$R_f \text{ (MPa)} = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot l}{b^3} \quad (5.3)$$

donde

$R_f$  es la resistencia a flexión (en megapascuales)

$b$  es el lado de la sección cuadrada del prisma (en milímetros)

$F_f$  es la carga aplicada en la mitad del prisma en la rotura (en newtons)

$l$  es la distancia entre soportes (en milímetros)

La resistencia a compresión  $R_c$ , en megapascuales, se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$R_c \text{ (MPa)} = \frac{F_c}{1600} \quad (5.4)$$

donde

$R_c$  es la resistencia a compresión (en megapascuales)

$F_c$  es la carga máxima de rotura (en newtons)

1600 es la superficie de los platos o placas auxiliares (en milímetros cuadrados)

### 5.3. Resultados y conclusiones

#### 5.3.1. Resultados

##### 5.3.1.1. Evolución de temperaturas

En este apartado se presentan los resultados referentes a evolución térmica tomados en distintos morteros. Se han recogido datos durante 36 horas y se han ensayado cinco muestras, una de ellas como patrón de referencia en la cual no se ha añadido dosis alguna de acelerante. Los resultados del ensayo se muestran en la figura 5.3.

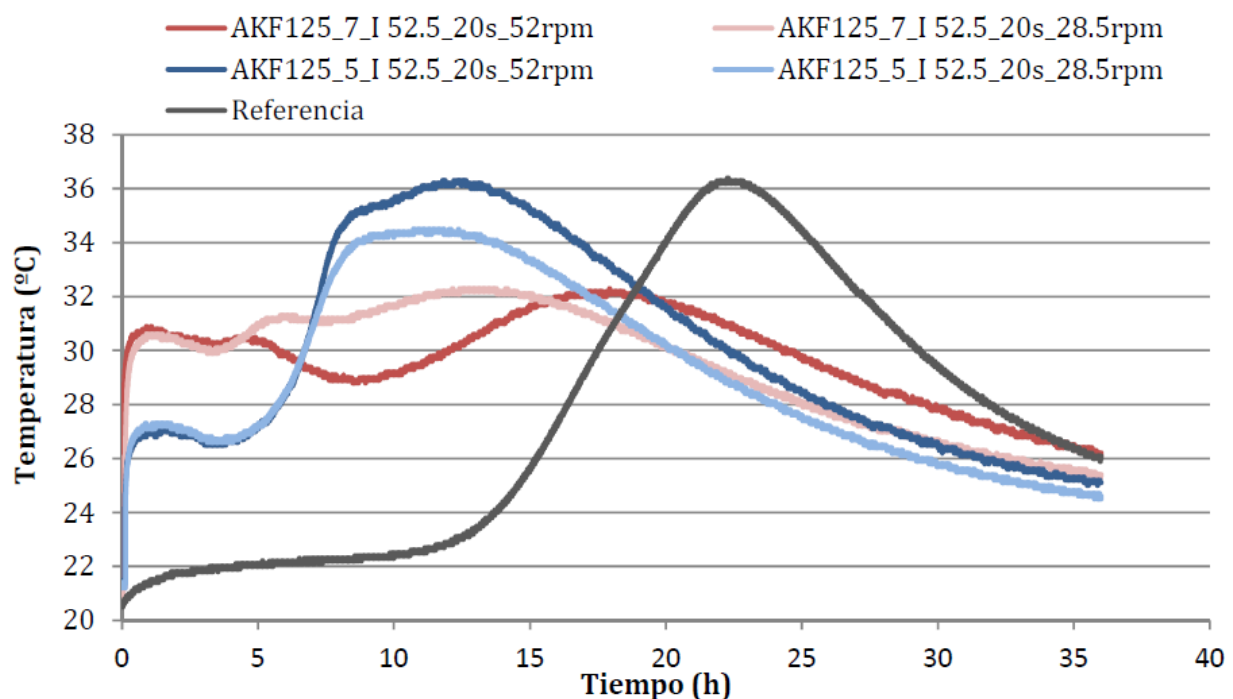


Figura 5.3- Evolución de temperaturas en morteros



Tal y como se puede observar en el gráfico de evolución de temperaturas, la curva del mortero sin acelerante se compone de un período de inducción (~10 horas) seguido de un único pico de temperatura. Este pico se corresponde con la hidratación de dos de los productos anhidros del clinker: Por un lado el aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) que da etringita ( $C_3A \cdot 3\bar{C}\bar{S} \cdot 32H$ ) y por otro, el silicato tricálcico ( $C_3S$ ) que da silicato cálcico hidratado (C-S-H), principal responsable de la resistencia e impermeabilidad. Tanto el silicato bicálcico ( $C_2S$ ) como el ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ) se hidratan varios días después. Cabe destacar que no ha sido posible captar el primer pico de temperaturas debido a la disolución de iones por el contacto del agua con el cemento, pues entre la producción de la muestra y la colocación final en los moldes pasan algunos minutos.

Para el caso de morteros con acelerante la curva tiene una forma distinta. En primer lugar, aparece un primer pico que corresponde a la formación de etringita, pero en este caso, formada en gran parte a partir de los iones procedentes del acelerante ( $Al^{3+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $OH^-$ ). Este proceso se da casi de manera inmediata una vez se introduce el acelerante en la mezcla. A continuación, se produce un período de inducción, esta vez, mucho más corto que para el caso de mortero sin acelerante (~2 horas), que va seguido de un período de aceleración y que acaba con un segundo pico de temperatura. Este segundo pico se produce por la formación tanto de etringita, en este caso formada a través de la hidratación del  $C_3A$ , como por la formación del C-S-H. Finalmente, la curva tiende a la temperatura ambiente.

Para una dosis de 5% de acelerante, se observa que el primer pico y el periodo de inducción para las dos velocidades de amasado es muy similar. Sin embargo, en el segundo pico, una velocidad mayor en el proceso de producción del mortero implica una mayor liberación de calor y que además, ésta se alcance en un tiempo también mayor. Éste fenómeno tiene su explicación en que una velocidad mayor contribuye a la disolución de iones que formarán los productos de la hidratación, por lo tanto, la velocidad de reacción de hidratación es mayor.

Para una dosis de 7%, el primer pico es mucho mayor que en el caso de 5%. El motivo es que a una mayor cantidad de acelerante, existe una mayor cantidad de iones destinados a la producción inicial de etringita. Por otro lado, la curva para esta dosis no tiene un segundo pico de temperatura tan marcado como en el caso de una dosis de 5%, esto es así por la influencia del ácido fosfórico. El ion  $Al^{3+}$  que lleva el acelerante no es muy estable en disolución acuosa, pues puede formar hidróxido de aluminio. Para que esta base no se forme, es necesario que haya un ácido en la formulación que cumpla la función de estabilizador. En el caso del AKF-125, este ácido es el ácido fosfórico, donde el ion  $PO_4^{3-}$  reacciona con iones  $Ca^{2+}$  formando  $Ca_3(PO_4)_2$  (compuesto muy insoluble). Esta reacción reduce la concentración de iones  $Ca^{2+}$  en gran medida, reduciendo la formación de etringita y C-S-H, de ahí que el segundo pico de temperaturas sea tan reducido. Este fenómeno se acrecienta para una velocidad mayor debido a la homogeneización del ácido.

### 5.3.1.2. Resistencia a la penetración

En este apartado se presentan los resultados referentes al ensayo de penetración. Se han ensayado dos morteros distintos, uno con velocidad de 28,5 rpm en el amasado y otro con 52 rpm, ambos con una dosis de 7% de acelerante.

Se ha decidido prescindir del ensayo de muestras con una dosis de 5% de acelerante, pues como ya se vio en la primera parte de la campaña, para los primeros tiempos de penetración no proporcionaba apenas resultados. Esto es así, porque en el ensayo de penetración, la resistencia mínima debe ser de 0,2 MPa y en ese caso, en muchas ocasiones, el valor se encontraba por debajo.

Se tomaron ocho mediciones por tiempo, cada 15 minutos y hasta dos horas tras la adición del acelerante.

Se ha aplicado el *Criterio de Chauvenet* <sup>(12)</sup> sobre los datos extraídos, para de esta forma detectar los valores atípicos y eliminarlos del posterior análisis. En este criterio se toma un valor como atípico si

$$x_i - \bar{x} > K(n) \cdot \sigma \quad (5.3)$$

donde:

$x_i$  es el valor de cada medición

$\bar{x}$  es la media de la muestra

K es un factor que depende del tamaño de la muestra (n) y que para el caso de n=8 vale 1,86

$\sigma$  es la desviación típica o estándar

Mediante la aplicación de este criterio se detectaron seis valores atípicos de un total de ciento noventa y dos datos recogidos. En las muestras con una velocidad de amasado menor (28,5 rpm) se eliminaron dos valores, uno para la medición de 15 minutos y uno para 45 minutos. En las muestras con una velocidad mayor (52 rpm) se eliminaron cuatro valores, uno para 45 min, dos para 60 y un último para 75 min.

También se han eliminado del análisis los datos de las últimas dos mediciones (105 y 120 min). El motivo es que no había apenas espacio libre en el molde para realizar las últimas penetraciones, quedando éstas muy cerca de algunas ya existentes. Este hecho no permitía mantener la distancia mínima entre penetraciones y las grietas se propagaban entre éstas, alterando así el valor de la resistencia obtenido. Este fenómeno se muestra en la figura 5.4.



Figura 5.4- Propagación de grietas entre penetraciones

En la tabla 5.6 se muestran los valores de resistencia promedio y coeficientes de variación en todos los tiempos. En la figura 5.5 se muestra la evolución de resistencias promedio para las muestras ensayadas, mientras que en la figura 5.6 se representan los coeficientes de variación, mediante los cuales se analiza la variabilidad interna de las mediciones.

Tabla 5.6. - Valores promedio de resistencia y coeficientes de variación en morteros

AKF125_7_I52,5_20s_28,5rpm			AKF125_7_I52,5_20s_52rpm		
Tiempo (min)	Resistencia promedio (MPa)	CV (%)	Tiempo (min)	Resistencia promedio (MPa)	CV (%)
15	0.25	12.43	15	0.25	7.93
30	0.35	16.65	30	0.32	8.97
45	0.44	9.83	45	0.41	6.34
60	0.52	9.59	60	0.48	5.86
75	0.61	11.36	75	0.55	9.00
90	0.63	11.29	90	0.65	13.97

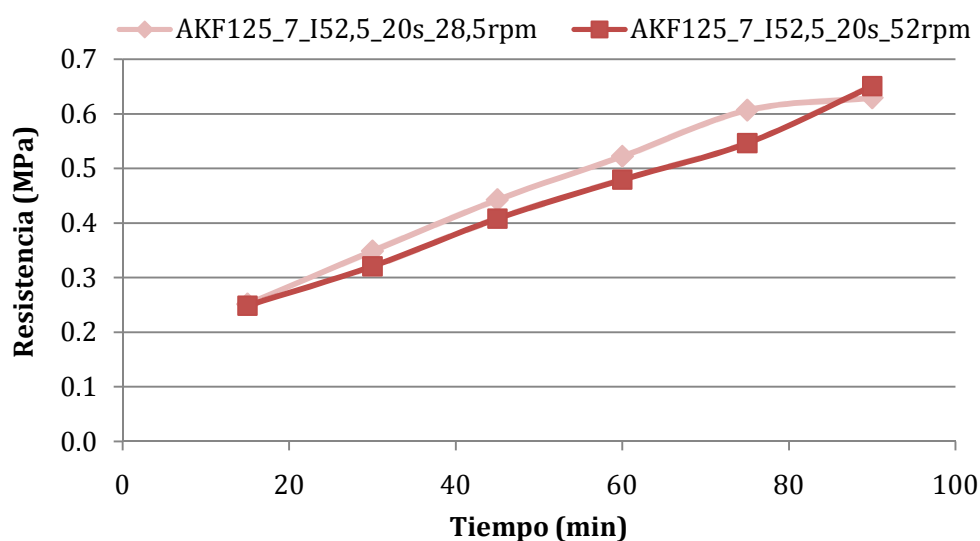


Figura 5.5 - Resistencia a la penetración en morteros

Tal y como puede observarse, el valor promedio de resistencia es ligeramente superior para la mezcla producida con una velocidad de 28,5 rpm (en todas menos en la última medición en la que esta tendencia se invierte), siendo la diferencia máxima de 0,06 MPa para un tiempo de 75 minutos.

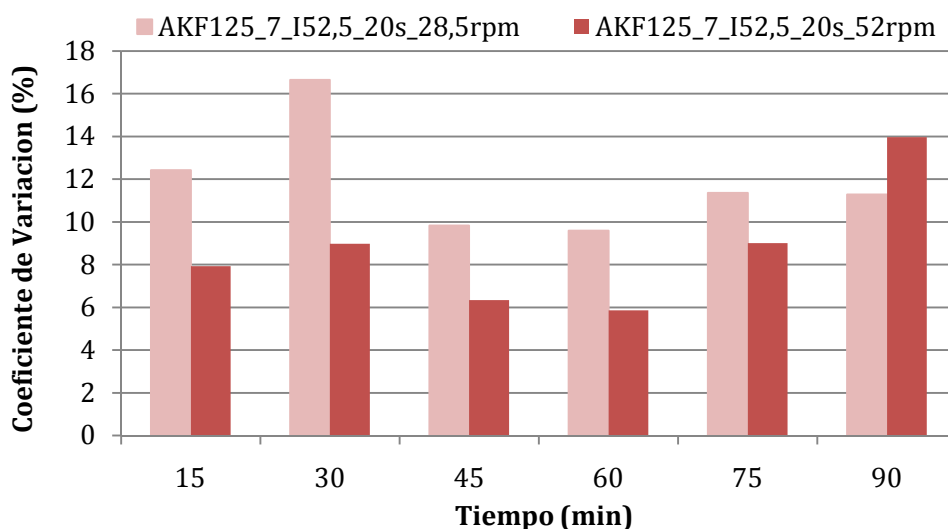


Figura 5.6 - Coeficiente de variación en resistencia a la penetración en morteros

Sin embargo, analizando estos valores desde un punto de vista de variabilidad (figura 5.6), se observa que el hecho de aumentar la velocidad en el proceso de producción del mortero comporta una notable mejoría en la dispersión de las mediciones, dando unos valores más homogéneos que con una velocidad de 52 rpm. El coeficiente de variación llega a reducirse prácticamente a la mitad para alguno de estos tiempos, como en el caso de 30 minutos, en que el coeficiente de variación para una velocidad de 28,5 rpm es de 16,65% mientras que para una velocidad de 52 rpm es de 8,97%.

### 5.3.1.3. Densidad y porosidad

Los ensayos de densidad y porosidad se realizaron en el Laboratorio de Materiales y Química de la UPC. En la tabla 5.7 se muestran los valores de densidad y porosidad y los coeficientes de variación de cada uno de ellos. Estos resultados se muestran de forma gráfica en las figuras 5.7 y 5.8.

Tabla 5.7. - Valores promedio y coeficientes de variación de densidad y porosidad

Muestra	Densidad promedio (g/cm <sup>3</sup> )	CV (%)	Porosidad promedio (%)	CV (%)
AKF125_5_II 42.5_20s_28.5rpm	2.13	0.66	13.03	5.58
AKF125_5_II 42.5_20s_52rpm	2.13	0.16	13.70	2.33
AKF125_7_II 42.5_20s_28.5rpm	2.08	1.23	15.20	7.12
AKF125_7_II 42.5_20s_52rpm	2.11	0.47	14.19	2.75

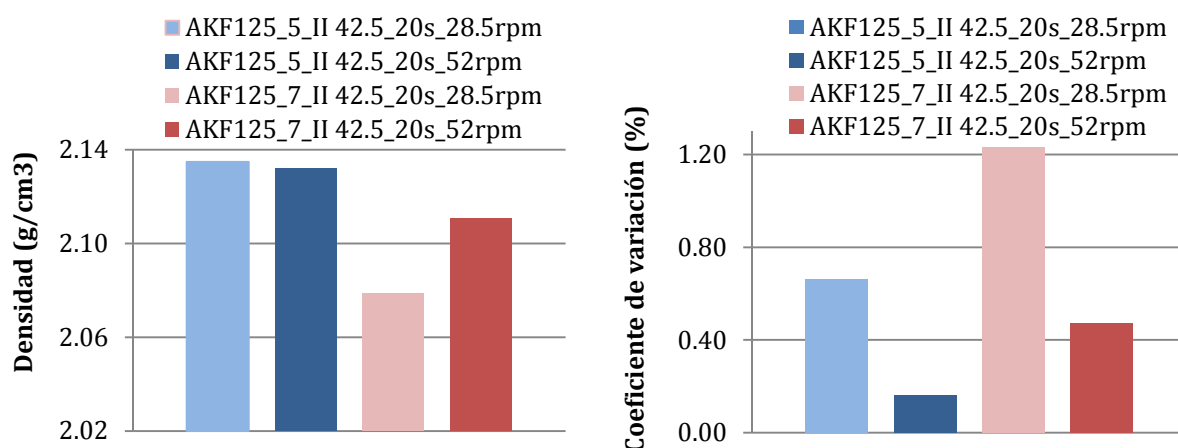


Figura 5.7 - Valor promedio y coeficiente de variación para densidad

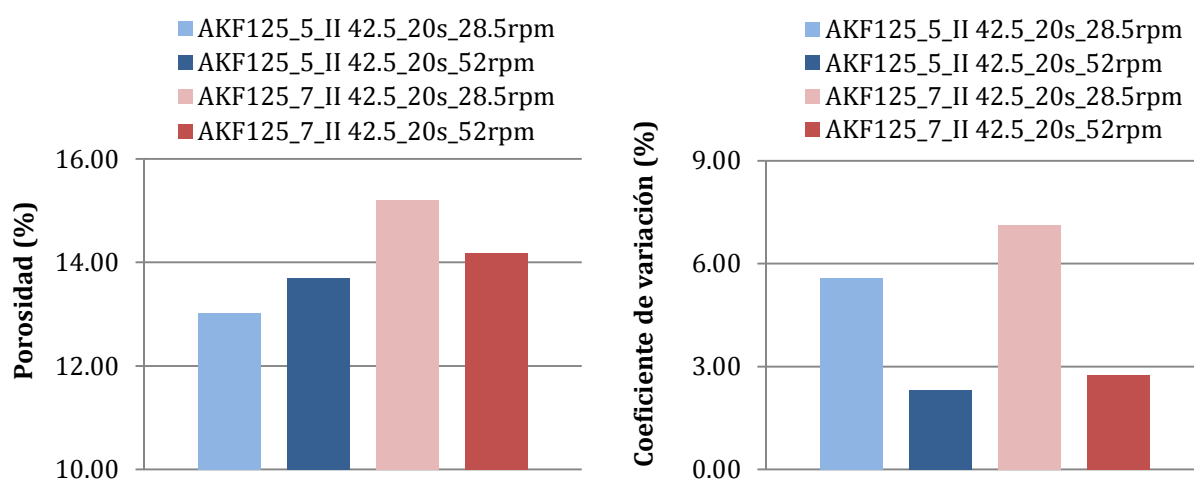


Figura 5.8 - Valor promedio y coeficiente de variación para porosidad

Se observa que, cuanto mayor es la dosis de acelerante, mayor es la porosidad obtenida, independientemente de la velocidad empleada en la producción. Asimismo, los resultados presentan una relación indirectamente proporcional entre la porosidad de las muestras y su densidad. De esta manera, a mayor porosidad de la muestra menor es la densidad obtenida.

Esta constatación se justifica por el propio proceso de producción de las probetas. Aunque se ha seguido rigurosamente el mismo procedimiento y tiempos de ejecución, es inevitable que una muestra con más acelerante presente una mayor pérdida de trabajabilidad lo que hace más difícil su compactación en los moldes y consecuentemente su porosidad es mayor y su densidad menor. En la figura 5.9 se observa esta problemática sobre los extremos de dos probetas realizadas con dosis distintas de acelerante (7 y 5% respectivamente) y dónde se puede ver que el acabado es peor para la probeta con mayor

dosis. Es lógico suponer que algo similar también puede ocurrir en el caso de proyectar el material, si bien de manera menos evidente dado que el tiempo desde la introducción del acelerante y la ejecución del revestimiento es más reducida.



*Figura 5.9- Acabado en probetas realizadas con dosis de 7 y 5% de acelerante respectivamente*

Analizando estos valores desde un punto de vista de variación en los datos, se observa claramente, que una velocidad mayor en el proceso de producción de las muestras introduce una reducción de la variabilidad tanto en la densidad como en la porosidad de los morteros. Este incremento de la velocidad llega a reducir el valor del coeficiente de variación en una media de un 68,5 % para densidad y un 59,8 % para porosidad.

#### *5.3.1.4. Resistencia a flexión*

A continuación, en la tabla 5.8, se muestran los valores referentes a resistencia a flexión para muestras realizadas con CEM I 52.5 R. En las figuras 5.10 y 5.11 se representan estos valores mediante gráficos.

*Tabla 5.8. - Valores promedio y coeficientes de variación para resistencias a flexión de muestras con CEM I 52.5 R*

Resistencia a flexión						
Muestra	1 día		7 días		28 días	
	Resistencia promedio (MPa)	CV (%)	Resistencia promedio (MPa)	CV (%)	Resistencia promedio (MPa)	CV (%)
AKF125_5_I 52.5_20s_28.5rpm	4.00	1.29	6.13	6.64	7.01	6.30
AKF125_5_I 52.5_20s_52rpm	4.25	2.87	6.89	7.85	7.01	3.85
AKF125_7_I 52.5_20s_28.5rpm	2.85	3.23	5.86	7.92	6.56	5.32
AKF125_7_I 52.5_20s_52rpm	2.12	2.43	6.13	5.46	7.41	5.21

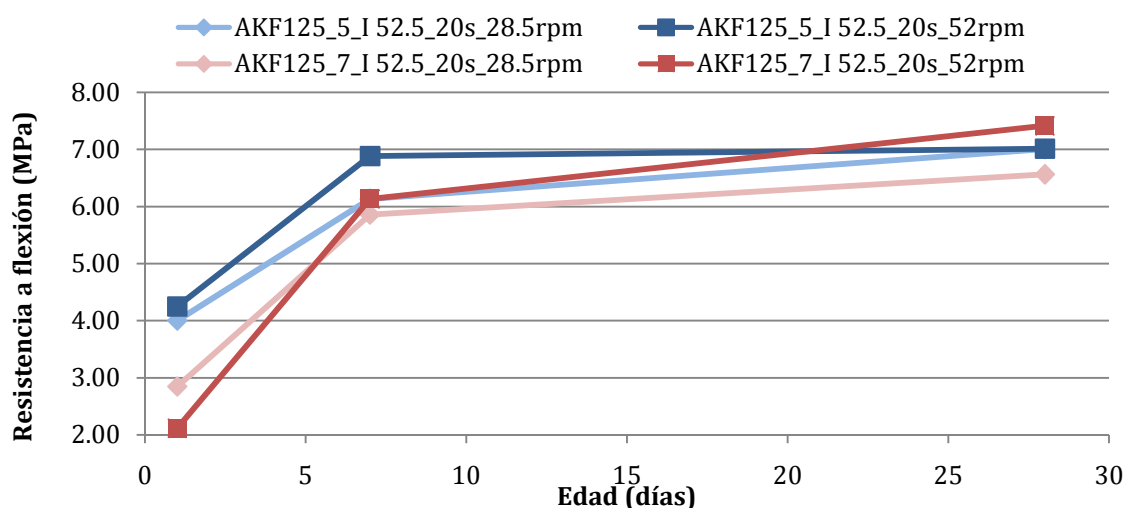


Figura 5.10- Resistencias a flexión promedio de muestras con CEM I 52.5 R

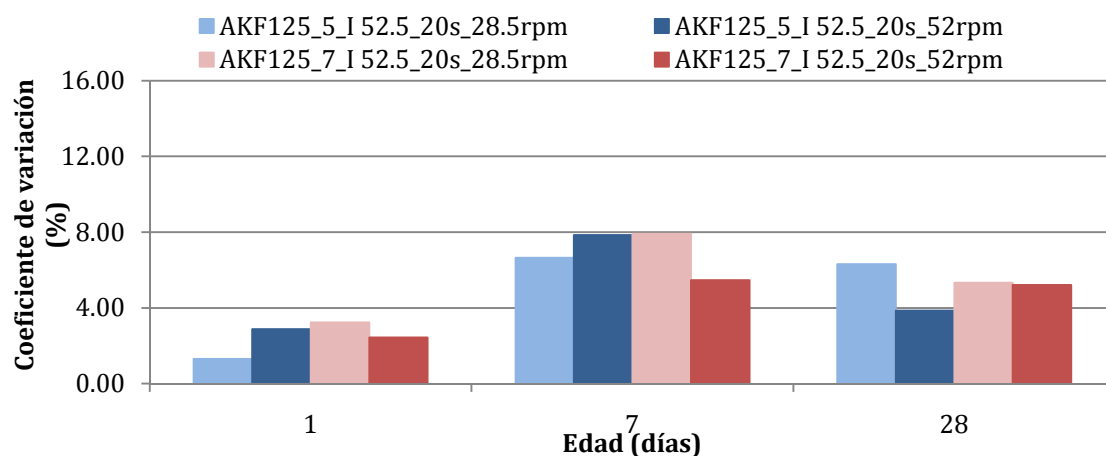


Figura 5.11- Coeficientes de variación de resistencias a flexión de muestras con CEM I 52.5 R

A continuación, en la figura 5.9 se muestran los resultados para muestras ejecutadas con CEM II/A-L 42.5 R. En las figuras 5.12 y 5.13 se representan estos valores mediante gráficos.

Tabla 5.9. - Valores promedio y coeficientes de variación para resistencias a flexión de muestras con CEM II /A-L 42.5 R

Mezcla	Resistencia a flexión					
	1 día		7 días		28 días	
	Resistencia promedio (MPa)	CV (%)	Resistencia promedio (MPa)	CV (%)	Resistencia promedio (MPa)	CV (%)
AKF125_5_II 42.5_20s_28.5rpm	3.83	4.90	6.82	11.22	7.41	7.13
AKF125_5_II 42.5_20s_52rpm	3.99	6.49	6.87	3.59	7.41	10.53
AKF125_7_II 42.5_20s_28.5rpm	3.31	15.43	5.15	12.76	6.63	10.15
AKF125_7_II 42.5_20s_52rpm	3.67	6.66	6.60	5.18	7.48	10.93

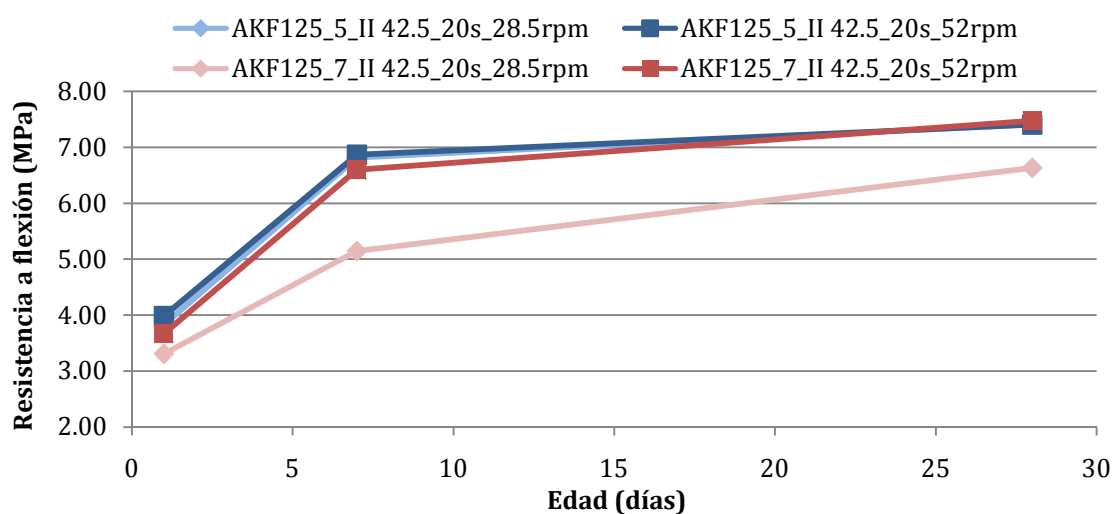


Figura 5.12- Resistencias a flexión promedio de muestras con CEM II/A-L 42.5R

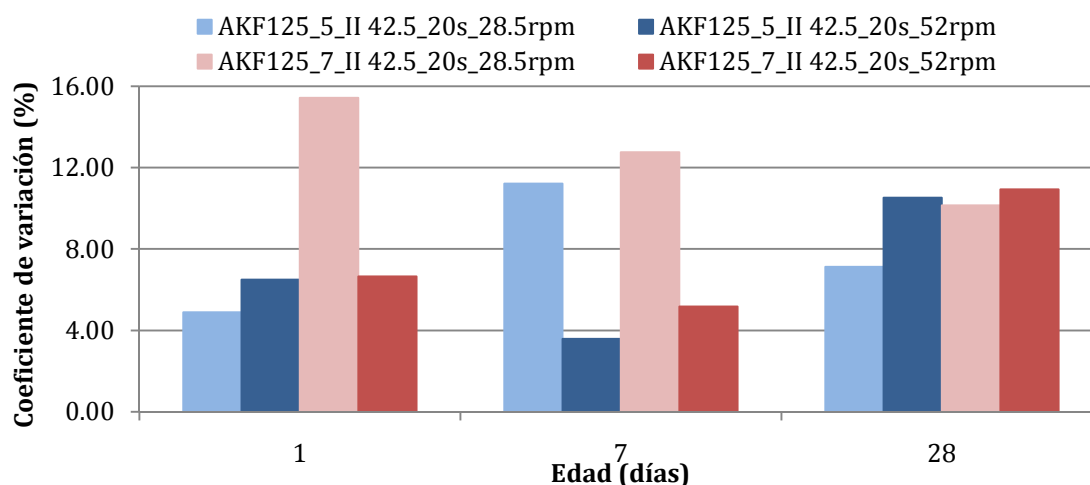


Figura 5.13- Coeficientes de variación de resistencias a flexión de muestras con CEM II/A-L 42.5R

Según se puede observar en los datos presentados, el valor de los promedio de resistencias son ligeramente superiores para las muestras ejecutadas con CEM II/A-L 42.5 R. Este cemento contiene filler calizo, que también contribuye a la formación de C-S-H, de ahí esas resistencias superiores.

Por otro lado, analizando las diferencias entre muestras con distintas dosis de acelerante, se observa que los valores de resistencia son mayores para las muestras con una dosis de 5%. Este fenómeno puede parecer contrario a lo esperado, sin embargo es totalmente lógico, pues como ya se comentó en el análisis de resultados de densidad y porosidad, una dosis mayor dificulta la compactación de las muestras en el molde, dando lugar a una probeta más porosa y en consecuencia, menor es la resistencia obtenida.

Se puede ver también en los gráficos de resistencia que una velocidad mayor en la producción de las muestras implica mayores resistencias para todos los casos analizados. La



energía cinética de las partículas es mayor y, por tanto, los choques entre los iones es más frecuente y la velocidad de reacción mayor.

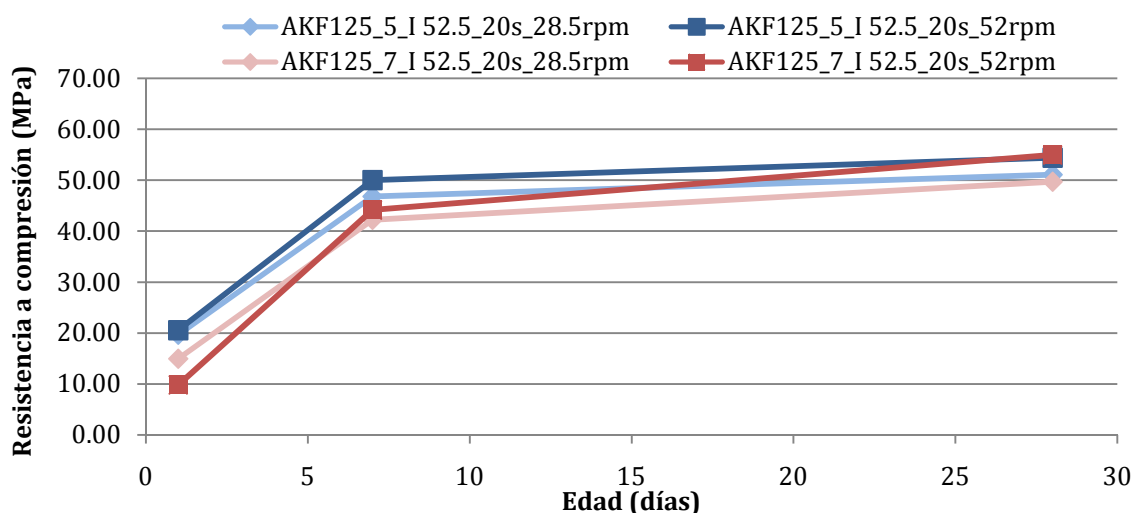
Respecto a la variación de los datos no se observan grandes ventajas de una velocidad de producción respecto a la otra, siendo el factor más determinante los valores promedio comentados en este punto.

#### 5.3.1.5. Resistencia a compresión

A continuación, en la tabla 5.10, se muestran los valores referentes a resistencia a compresión para muestras realizadas con CEM I 52.5 R. En las figuras 5.14 y 5.15 se representan estos valores mediante gráficos.

*Tabla 5.10- Valores promedio y coeficientes de variación para resistencias a compresión de muestras con CEM I 52.5 R*

Mezcla	Resistencia a compresión					
	1 día		7 días		28 días	
	Resistencia promedio (MPa)	CV (%)	Resistencia promedio (MPa)	CV (%)	Resistencia promedio (MPa)	CV (%)
AKF125_5_I 52.5_20s_28.5rpm	19.69	3.67	46.79	3.40	51.07	5.62
AKF125_5_I 52.5_20s_52rpm	20.58	3.84	50.05	2.64	54.43	2.46
AKF125_7_I 52.5_20s_28.5rpm	14.98	4.02	42.25	6.25	49.71	1.23
AKF125_7_I 52.5_20s_52rpm	9.83	6.50	44.17	5.01	54.97	2.63



*Figura 5.14- Resistencias a compresión promedio de muestras con CEM I 52.5 R*

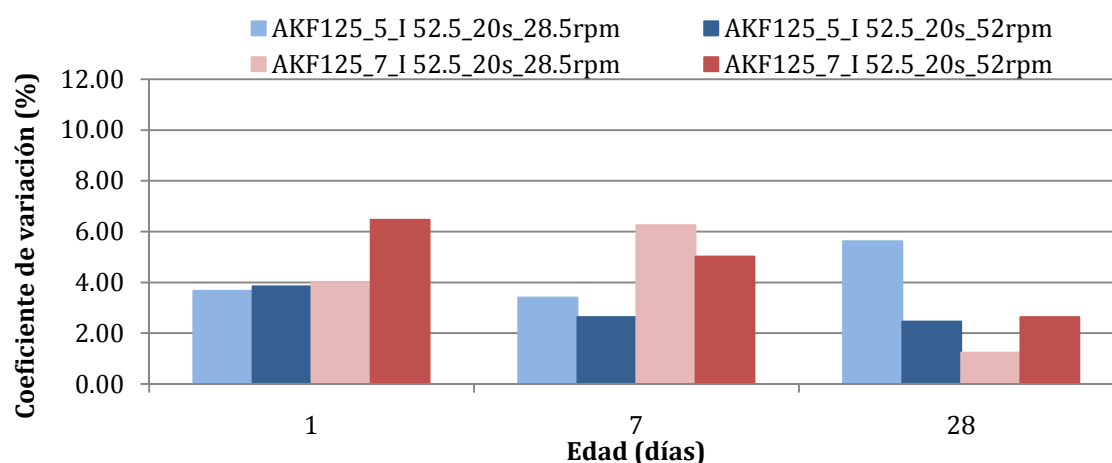


Figura 5.15- Coeficientes de variación de resistencias a compresión de muestras con CEM I 52.5R

A continuación, en la tabla 5.11 se muestran los resultados para muestras ejecutadas con CEM II/A-L 42.5 R. En las figuras 5.16 y 5.17 se representan estos valores mediante gráficos.

Tabla 5.11. - Valores promedio y coeficientes de variación para resistencias a compresión de muestras con CEM II /A-L 42.5 R

Resistencia a compresión						
Mezcla	1 día		7 días		28 días	
	Resistencia promedio (MPa)	CV (%)	Resistencia promedio (MPa)	CV (%)	Resistencia promedio (MPa)	CV (%)
AKF125_5_II 42.5_20s_28.5rpm	15.60	3.70	49.72	3.78	59.53	4.74
AKF125_5_II 42.5_20s_52rpm	16.97	5.65	49.88	2.49	62.28	4.94
AKF125_7_II 42.5_20s_28.5rpm	14.62	6.56	40.46	3.07	54.30	1.91
AKF125_7_II 42.5_20s_52rpm	15.54	6.17	45.10	2.75	57.58	5.11

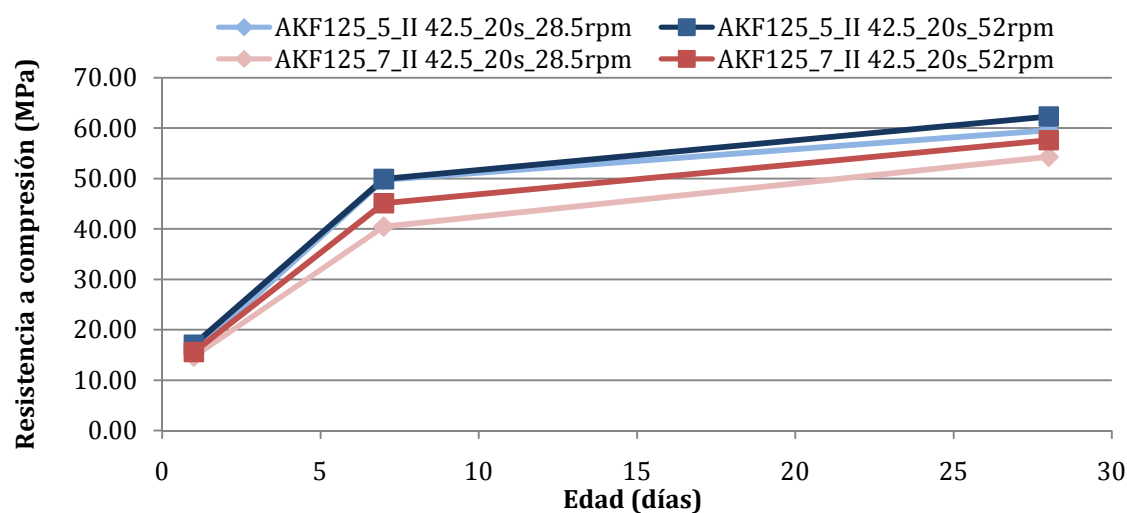
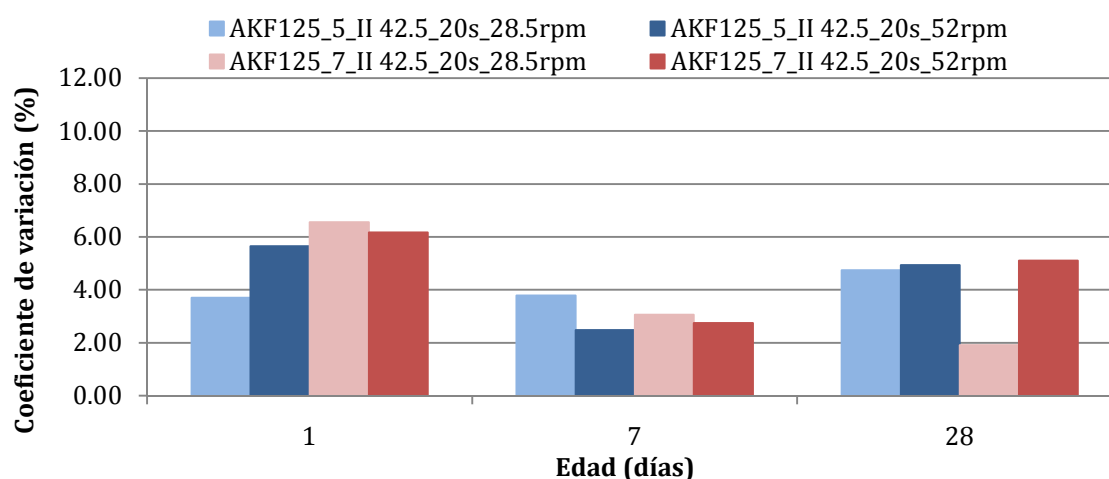


Figura 5.16- Resistencias a compresión promedio de muestras con CEM II /A-L 42.5 R



*Figura 5.17- Coeficientes de variación de resistencias a compresión de muestras con CEM II /A-L 42.5 R*

Según se puede observar en los datos presentados, el valor de los promedio de resistencias son ligeramente superiores para las muestras ejecutadas con CEM II/A-L 42.5 R.

Por otro lado, analizando las diferencias entre muestras con distintas dosis de acelerante, se observa que los valores de resistencia son mayores para las muestras con una dosis de 5%. De la misma forma que ya se comentó en el caso de flexión, una mayor dosis dificulta la compactación de las muestras en el molde, dando lugar a una probeta más porosa y en consecuencia, menor es la resistencia.

Se puede ver también en los gráficos de resistencia que una velocidad mayor en la producción de las muestras implica mayores resistencias para todos los casos analizados. La energía cinética de las partículas es mayor y, por tanto, los choques entre los iones es más frecuente y la velocidad de reacción mayor.

Respecto a la variación de los datos, se observa que los valores del coeficiente de variación en la resistencia a compresión son menores que para flexión. El motivo, es que en la rotura en flexión, la fuerza se ejerce mediante un rodillo de carga que actúa en el centro de la probeta a lo ancho de una de sus caras. Ésto hace que la rotura se produzca por un único punto de la probeta, por lo cual, cualquier grieta o muesca que tenga cercana a la zona de aplicación de la fuerza, puede resultar un potencial punto de rotura, alterándose así los resultados de resistencias. Sin embargo, en compresión, una placa rectangular comprime casi la totalidad de la muestra hasta su rotura gracias a la formación de varias grietas, por lo cual, una imperfección en la muestra no suele suponer una debilidad, siendo los valores de resistencia mucho más uniformes entre ellos.

### 5.3.2. Conclusiones

En este apartado, se presentan las conclusiones del capítulo. Éstas se dividen en dos grupos: Las conclusiones sacadas de la ejecución de los ensayos y las conclusiones del análisis de los resultados finales.

#### 5.3.2.1. Conclusiones de la ejecución de los ensayos

- Es necesario disponer de moldes suficientemente grandes que garanticen la distancia mínima entre mediciones durante el ensayo de penetración. Si no es así, los resultados (sobre todo en tiempos finales) pueden verse afectados por la influencia de las penetraciones anteriores, principalmente cuando el hormigón empieza a endurecer.
- Los resultados del ensayo de densidad y porosidad, y de resistencia a flexión y compresión, se ven afectados en parte por el proceso de producción de las probetas. La falta de trabajabilidad provocada por el acelerante, implica para dosis relativamente grandes una peor compactación del mortero en el molde alterando así el resultado final.

#### 5.3.2.2. Conclusiones de los resultados

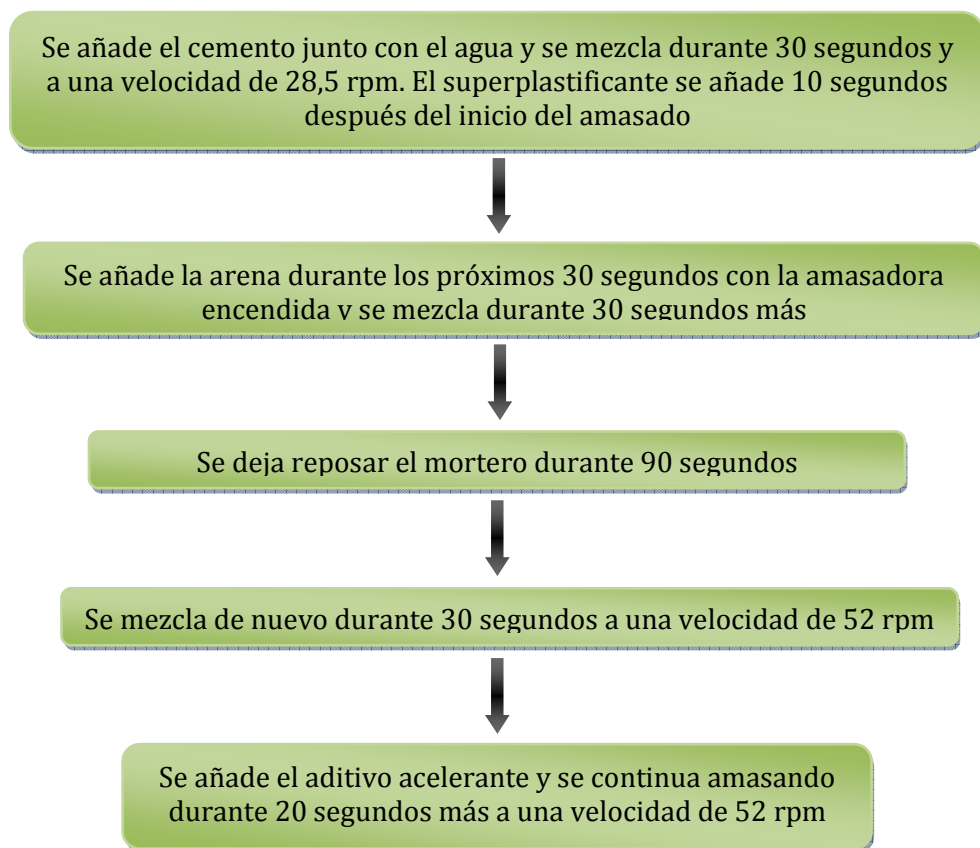
- En la curva de evolución de temperaturas de muestras con acelerante aparece un primer pico que la diferencia de las muestras sin acelerante. Este pico se debe a la formación inicial de etringita a partir de los iones procedentes del acelerante ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$ ). La adición del acelerante también acorta los períodos de inducción y aceleración (inicio-final de fraguado).
- A mayor dosis de acelerante, mayor es el primer pico. El motivo es que a una mayor cantidad de acelerante, existe una mayor cantidad de iones destinados a la producción inicial de etringita. Por otro lado, cuando existen grandes dosis de acelerante, el segundo pico de la curva se reduce de manera drástica debido a la actuación del ácido fosfórico que, lógicamente, también se encuentra en mayor cantidad. El ion  $\text{PO}_4^{3-}$  reacciona con los iones  $\text{Ca}^{2+}$  reduciendo su concentración y reduciendo por tanto la formación de etringita y C-S-H.
- La velocidad de amasado en la producción de las muestras también tiene efectos sobre la curva de evolución de temperaturas. Para el caso de una dosis de 5%, se observa que una velocidad mayor implica una mayor liberación de calor, pues este aumento de la velocidad implica que la energía cinética de las partículas sea mayor y, por tanto, los choques entre los iones son más frecuentes y la velocidad de reacción más grande. En el caso de una dosis de 7%, este aumento de la velocidad ayuda a homogeneizar el ácido fosfórico, acrecentándose su efecto y produciéndose una caída

en el calor liberado entre el primer y segundo pico y retrasando en el tiempo éste último.

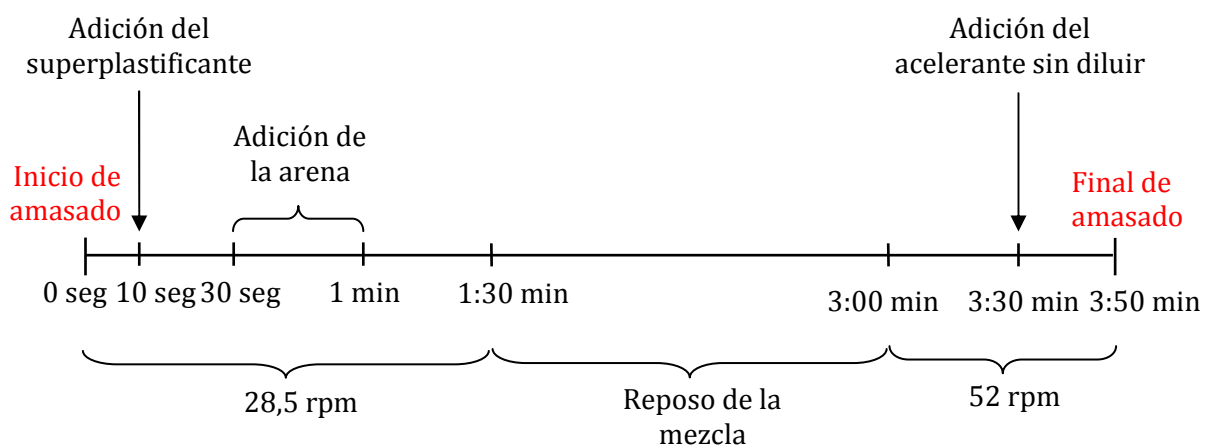
- Los resultados del coeficiente de variación en el ensayo de penetración muestran que una velocidad mayor en la producción del mortero implica una mayor uniformidad en los datos, reduciéndose en algunos tiempos el coeficiente de variación hasta la mitad.
- Se observa que, cuanto mayor es la dosis de acelerante, mayor es la porosidad obtenida, independientemente de la velocidad empleada en la producción. Asimismo, los resultados presentan una relación indirectamente proporcional entre la porosidad de las muestras y su densidad. De esta manera, a mayor porosidad de la muestra menor es la densidad obtenida.
- La velocidad en el proceso de amasado afecta de forma notable en los resultados de densidad y porosidad. Una velocidad mayor comporta una mayor uniformidad, llegando a reducir el valor del coeficiente de variación en una media de un 68,5 % para densidad y un 59,8 % para porosidad.
- Respecto a los valores de resistencia a flexión y compresión, se tiene que la resistencia es mayor para dosis con un 5% de acelerante. Este hecho tiene su explicación en la pérdida de trabajabilidad para dosis elevadas de acelerante durante el proceso de producción de las probetas.
- Se observa que una velocidad mayor en el proceso de producción implica mayores resistencias para una misma dosis de acelerante.
- Los coeficientes de variación son menores en el ensayo de compresión que en el de flexión. Esta constatación se justifica por el desarrollo del propio ensayo: Mientras que en flexión la muestra se carga en un eje a lo ancho de una de sus caras, en compresión se ejerce una presión en toda la superficie de la muestra. Ésto, hace que cualquier imperfección o grieta previa cercana al punto de carga, comporte una debilidad para el caso de flexión, llevando a rotura la muestra para una resistencia menor de la esperada. Mientras, la compresión no es tan vulnerable frente a este tipo de imperfecciones.

#### **5.4. Propuesta formal del método de producción**

Mediante los ensayos realizados se valida el método de producción propuesto en el capítulo 4. Así pues, la adición del acelerante se realiza de forma concentrada, el tiempo de amasado del acelerante en la mezcla son 20 segundos y la velocidad empleada 52 rpm. Los pasos a seguir en el amasado se describen en la figura 5.18, mientras que en la figura 5.19 se puede ver en forma de esquema cronológico el proceso de producción.



*Figura 5.18- Metodología propuesta para la producción de morteros con acelerante de fraguado*



*Figura 5.19- Esquema cronológico del proceso de producción*

## 6. CONCLUSIONES FINALES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

### 6.1. Conclusiones generales

Como se ha podido ver a través de este trabajo, el campo de los acelerantes es extremadamente amplio y conviene seguir ampliando conocimientos sobre estos aditivos y su influencia sobre el hormigón proyectado. No obstante, mediante la elaboración de esta tesis de máster, se ha variado la metodología en la producción de morteros con acelerante de fraguado, que tiene como finalidad la caracterización de dichos acelerantes en una escala reducida y el cual es de gran utilidad, pues permite realizar estas funciones en laboratorio y sin la necesidad de realizar proyecciones ni laboriosos ensayos para ello. Además, el cambio en la metodología permite aumentar resistencias, reducir la variabilidad de los datos de diversos ensayos.

## 6.2. Conclusiones específicas

En el Capítulo 1 se han propuesto unos objetivos específicos en relación al tema estudiado. En respuesta a estos objetivos específicos se muestran varios avances descritos de manera detallada en los demás capítulos que componen el presente trabajo. A fin de dar una visión de los principales avances, a continuación se muestran las conclusiones específicas del tema tratado.

- Se ha realizado una revisión sobre la literatura referente a los aspectos generales del hormigón proyectado, los aditivos acelerantes y los ensayos de caracterización comunmente empleados en esta técnica de construcción. En dicha revisión se ha podido ver que el hormigón proyectado continua actualmente evolucionando, ampliando sus campos de aplicación y mejorando sus características. Parte de estas mejoras se deben a la actuación de los acelerantes, los cuales también siguen en evolución, en especial los libres de álcalis que cada día son más utilizados. Por otro lado, las características de puesta en obra del hormigón proyectado, hacen difícil repetir las condiciones en un laboratorio y su posterior ensayo. Estas carencias en la caracterización del material, ofrecen una vía de estudio importante, pues ofrece una gran proyección de futuro.
- Se han analizado los métodos convencionales tradicionalmente empleados para la caracterización de los acelerantes en mezclas de mortero mediante el estudio de campañas previas. En concreto se ha estudiado una campaña realizada sobre distintos tipos de acelerantes empleando el método convencional y se observó que los resultados obtenidos ofrecían unas variabilidades muy altas en muchos casos superiores al 20% y en algún caso concreto superior al 50%.
- Se ha llegado a la conclusión de que variables como el modo de adición del acelerante, la velocidad y el tiempo de amasado influyen directamente sobre el resultado final de la mezcla. Para reafirmar esta idea, se propuso un estudio para ver la influencia de dichas variables.
- Mediante el estudio de las distintas variables a través del ensayo de penetración, se ha decidido aumentar la velocidad en el proceso de producción, pues esta modificación ofrecía un aumento de resistencias y una mejora en la variabilidad de los datos. Los cambios de las demás variables no aportan mejoras en los resultados de dicho ensayo.
- A través de la realización de nuevos ensayos tanto en cortas como largas edades, se valida el procedimiento de producción propuesto, pues se observa que permite aumentar resistencias y reducir la dispersión de los datos de los distintos ensayos realizados.



### **6.3. Perspectivas futuras**

A pesar de los avances obtenidas con este trabajo, todavía hay espacio para nuevos estudios en relación a los aditivos acelerantes y en concreto al método de producción de morteros. Teniendo esto en cuenta, se proponen nuevas tareas a realizar que sigan con estos estudios.

Es importante remarcar que el estudio ha sido realizado únicamente sobre morteros producidos en amasadora. Para continuar con estudios en relación a la caracterización de acelerantes, se propone realizar alguna proyección por vía húmeda. Otra opción futura es la de desarrollar estudios similares, esta vez en hormigón.

Respecto a los ensayos realizados en el presente trabajo, se plantea utilizar nuevas técnicas de caracterización como son el ensayo de retracción o los ultrasonidos. De esta forma se espera ampliar la información obtenida sobre las variables en el proceso de producción de morteros. Además, se cree necesario mejorar los ensayos ya conocidos con el fin de que el proceso de ejecución de éstos afecte de la menor forma posible a los datos obtenidos.

Con estas propuestas se espera profundizar en los conocimientos ya alcanzados en estas líneas de estudio.



## BIBLIOGRAFÍA

1. **Aguado, A.** Hormigón proyectado. Curso sobre hormigón. Barcelona, España. 1992.
2. -. **BASF Construction Chemicals España, S.L.** Tecnología BASF aplicada al hormigón proyectado.
3. **Agulló, L., Aguado, A., Josa, A., Gettu, R.** Tendencias del hormigón proyectado en la construcción de túneles. *Cemento hormigón : fabricación, investigación y aplicaciones del cemento y del hormigón*. 1999, vol. 70, núm. 800, pp. 839-857.
4. **Rey A., Pardo G., Hurtado R. (SIKA S.A.U.)**. Túneles y Obras Subterráneas. 2010.
5. **Prudêncio Jr. L.R.** Accelerating Admixtures for Shotcrete. [ed.] Elsevier Science Ltd. *Cement and Concrete Composites*, 20. Santa Catarina, Brasil. 1998. pp. 213-219.
6. **Taylor, H.W.** Cement Chemistry. 2a edición. Londres. Thomas Telford Publishing. 1998.
7. **DiNoia T.P., Sandberg P.J.** Alkali-free shotcrete accelerator interactions with cement and admixtures. [ed.] Taylor & Francis Group. *Shotcrete: More Engineering Developments*. London, United Kingdom. 2004. pp. 137-144. ISBN: 04-1535-898-1 .
8. **Pialarissi Cavalero, S.H., Galobardes I.** Caracterización de aditivos acelerantes de fraguado libres de álcali para hormigón proyectado por vía húmeda. Barcelona, España. 2012.
9. **Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR**. Norma *UNE-EN 14488-2*, ("Ensayos de hormigón proyectado. Parte 2: Resistencia a compresión del hormigón proyectado a corta edad"). 2007.
10. **Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR**. Norma *UNE-EN 1015-10*, ("Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido"). 2000.
11. **Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR**. Norma *UNE-EN 196-1*, ("Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas"). 2005.
12. **Hugh W. Coleman, W.Glenn Steele**. Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers (3rd Revised edition). United Kingdom. 2009. ISBN: 978-0-470-16888-2.

